

Über Untersuchungen des Auflösungsvermögens
des menschlichen Auges
im horizontalen Gesichtsfeldmeridian

WOLFGANG BÄUMGES

1967



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus der Universitäts-Augenklinik der
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Direktor: Professor Dr.med. A. Nover

Über Untersuchungen des Auflösungsvermögens
des menschlichen Auges
im horizontalen Gesichtsfeldmeridian

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

vorgelegt von
Wolfgang Bäumges
aus Korschenbroich

Mainz 1967

THE UNIVERSITY OF LEIDEN
LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF LEIDEN
LEIDEN, NETHERLANDS

THE UNIVERSITY OF LEIDEN
LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF LEIDEN
LEIDEN, NETHERLANDS



THE UNIVERSITY OF LEIDEN
LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF LEIDEN
LEIDEN, NETHERLANDS

THE UNIVERSITY OF LEIDEN
LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF LEIDEN
LEIDEN, NETHERLANDS

THE UNIVERSITY OF LEIDEN

Dekan : Professor Dr. med. L. Diethelm

Referent : Professor Dr. med. O. Oppel

Korreferent: Professor Dr. med. A. Nover

Meinen Eltern
in Dankbarkeit gewidmet

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

	Seite
1. Einleitung	3
 <u>Allgemeiner Teil</u>	
2. Definition des Auflösungsvermögens	4
3.1. Faktoren mit Einfluß auf die Sehschärfe	4
3.2. Leuchtdichte und Kontrast des Sehzeichens	4
3.3. Dauer der Darbietung	5
3.4. Entfernung und Gesamtgröße	6
3.5. Art des Sehzeichens	6
3.6. Übung	6
4. Geschichtlicher Abriß über die Messung der peripheren Sehschärfe	7
5. Die Sehzeichen	17
 <u>Experimenteller Teil</u>	
6.1. Versuchsanordnung	21
6.2. Lichtquelle	21
6.3. Sehzeichenblende	21
6.4. Linsensystem mit veränderlicher Brennweite	22
6.5. Umlenkspiegel	24
6.6. Projektionswand	24
6.7. Versuchsperson	24

7.	Untersuchungsgut	26
8.	Vorbereitungen zur Messung	27
9.1.	Messung	27
9.2.	Mittelwerte der Bildgrößen	34
9.3.	Mittelwerte der Sehschärfen	36
9.4.	Mittelwerte der relativen Bildgrößen	38
9.5.	Mittelwerte der relativen Sehschärfen	39
10.	Diskussion der Meßergebnisse	41
11.	Gegenüberstellung von Auflösungsvermögen und Struktur der Netzhaut	43
12.	Zusammenfassung	53
	Literatur	55

1. Einleitung

Trotz umfangreicher wissenschaftlicher Forschungen ist es bisher nicht gelungen, die verschiedenen Leistungen des visuellen Systems (Lichtsinn, Bewegungssinn, Farbsinn, Trennvermögen und Gestaltsinn) sowie die Funktionsprinzipien des Gesichtssinnes aus der Struktur der Retina restlos zu klären.

O e s t e r b e r g hat durch exakte Untersuchungen Aufschluß über den anatomischen Aufbau ihrer Rezeptorenschicht und die Verteilung der Zapfen und Stäbchen in den einzelnen Netzhautabschnitten gegeben.

Ein Vergleich zwischen Anzahl, Gestalt und Verbindung der einzelnen anatomischen Netzhautelemente einerseits und der rezeptiven Leistung der Retina andererseits müßte einen Einblick in bestimmte funktionelle Zusammenhänge unter definierten Bedingungen erwarten lassen. Die Messung des optischen Auflösungsvermögens in verschiedenen Netzhautabschnitten - als einer ihrer wichtigsten funktionellen Leistungen - bietet sich daher geradezu an, um nach Beziehungen zwischen den anatomischen Netzhautstrukturen und vorliegenden Funktionsprinzipien zu suchen.

Seit rund 125 Jahren haben daher bereits viele Forscher das Auflösungsvermögen der Netzhaut in ihren verschiedenen Bereichen quantitativ untersucht. Sie erhielten z. T. recht unterschiedliche Ergebnisse. Es war daher von Interesse, diese Messungen mit Hilfe moderner optischer Geräte zu wiederholen.

2. Definition

Ausdruck der Sehschärfe des Auges ist der kleinste Gesichtswinkel, unter dem zwei von der Grundfläche kontrastierende Punkte oder Details eines Sehzeichens noch eine getrennte Empfindung im Sehorgan hervorrufen. Zahlenmäßig ist die Sehschärfe gleich dem Kehrwert des in Minuten ausgedrückten Schwinkels (Tschermak - Seysenegg).

Guillery definiert das Auflösungsvermögen (minimum separabile) durch den kleinsten Zwischenraum, unter dem zwei im Kontrast zur Grundfläche stehende Punkte oder Linien noch getrennt wahrgenommen werden können.

Demnach dürfen Sehschärfe und Auflösungsvermögen begriffsmäßig gleichgesetzt werden.

3.1. Faktoren mit Einfluß auf die Sehschärfe

Die Größe des Auflösungsvermögens wird begrenzt durch Faktoren seitens des Auges, wie Abbildungsfehler des dioptrischen Apparates (Müller, Dobrowolsky und Gaine), Adaptationszustand (Schober) und das funktionelle Sinneszellenraster der Netzhaut (Guillery).

In sehr großem Maße nimmt allerdings auch die Untersuchungsmethode Einfluß auf die Meßergebnisse für die Sehschärfe.

3.2. Leuchtdichte und Kontrast des Sehzeichens

König fand, daß mit zunehmender Beleuchtung der Prüfobjekte die Sehschärfe ansteigt, daß sie in einem Bereich von etwa 1000 lx bis 64000 lx nicht mehr zu steigern ist und bei noch höheren Lichtintensitäten infolge Blendung wieder sinkt (siehe Abb. 1).

Aulhorn berichtete in jüngster Zeit über gleiche Ergebnisse.

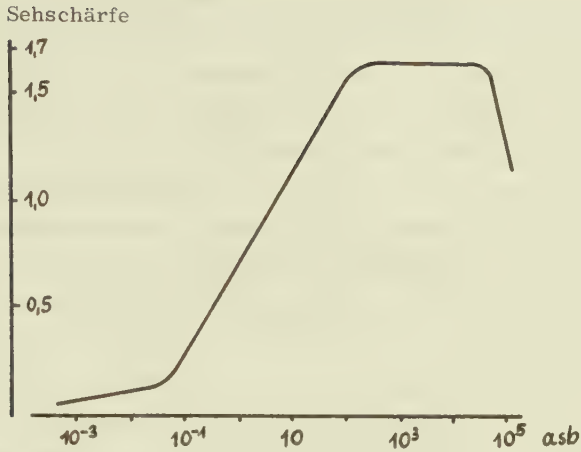


Abb. 1 (nach K ö n i g) Abhängigkeit der
Sehschärfe von der Leuchtdichte

Unter Kontrast versteht man im Zusammenhang mit einer Sehschärfenmessung das Verhältnis von Sehzeichenleuchtdichte und Umfeldleuchtdichte. Der Kontrast ist gegeben sowohl bei hellem Sehzeichen auf dunkler Grundfläche, als auch bei dunklem Sehzeichen auf heller Grundfläche.

S l o a n stellte fest, daß unterhalb eines Kontrastes von 1 : 6 die Sehschärfe geringer wird.

3.3. Dauer der Darbietung

M o n j é zeigte, daß bei kurzzeitiger Beleuchtung seiner Sehzeichen ein höherer Wert für das Auflösungsvermögen zu messen ist, als bei Dauerdarbietung. Dies wird heute durch eine Erhöhung der Empfindungsschwelle infolge "lokaler Adaptation" bei Dauerdarbietung des Prüfobjektes erklärt (S c h o b e r).

3.4. Entfernung und Gesamtgröße des Sehzeichens

Schon A u b e r t und F ö r s t e r fanden, daß nahe, kleine Objekte in einem größeren Teil des Gesichtsfeldes noch erkannt werden können, als große, weiter entfernte Zeichen, obwohl sie unter gleichem Gesichtswinkel gesehen werden.

W e r t h e i m bemerkte bei seinen Versuchen mit Drahtgittern, daß die Richtung der Drähte umso leichter erkannt wurde, je größer das Gitter bei gleichbleibender Drahtstärke war. S t u d n i t z führt dies auf einen Summationseffekt zurück.

3.5. Art des Sehzeichens

Die Form des Testobjektes hat größten Einfluß auf die Ergebnisse bei Messungen des Auflösungsvermögens. M o n j é schrieb, daß sich die Sehschärfe mit absoluter Genauigkeit überhaupt nicht feststellen lasse, da sie abhängig sei von der Art der verwendeten Sehzeichen. D r e y e r fügte hinzu: "Es gibt fast so viele verschiedene Testkarten zur Sehschärfenbestimmung, wie es Augenkliniken gibt." Weitere Ausführungen zu diesem Punkt werden im Abschnitt 5. gemacht.

3.6. Übung

Mehrere Autoren glauben durch entsprechende Versuche nachgewiesen zu haben, daß die Übung sich positiv auf die periphere Sehschärfe auswirke, und daß dieser Einfluß vom Zentrum zur Peripherie des Gesichtsfeldes zunehme. D o b r o w o l s k y und G a i n e wollen nach dreieinhalbmonatiger Übung Steigerungen der Sehschärfe in verschiedenen Gesichtsfeldbereichen von 1 : 1,5 bis 1 : 10 ermittelt haben.

4. Geschichtlicher Abriss über die Messung der peripheren Sehschärfe

In der physiologischen Optik wird zwischen direktem oder zentralem und indirektem Sehen unterschieden. Von direktem oder zentralem Sehen spricht man, wenn das Sehzeichen fixiert und in der Foveola abgebildet wird. Indirektes oder peripheres Sehen liegt vor, wenn die Gesichtslinie am Sehobjekt vorbeigerichtet ist und dieses auf einem peripheren Netzhautort - dem jedoch eine gewisse Aufmerksamkeitszuwendung eingeräumt wird - zur Abbildung gelangt.

Über erste Versuche zur quantitativen Erforschung der indirekten Sehschärfe wurde von H ü c k (1840) und von V o l k m a n n (1846) berichtet. Sie stellten fest, wie weit neben einem fixierten Punkt angebotene Doppelstriche verschiedener Dicke und Entfernung voneinander noch getrennt wahrgenommen werden konnten.

Eine größere Arbeit wurde 1857 von A u b e r t und F ö r s t e r veröffentlicht. Sie verwendeten zu ihren Versuchen auf weißes Papier gedruckte Buchstaben und Ziffern von verschiedener Größe mit bestimmten, untereinander gleichen Zwischenräumen. Das Blatt Papier, auf zwei senkrechte Walzen aufgerollt, konnte man dem Auge näher und ferner bringen, und durch Drehen der Walzen war die Möglichkeit gegeben, neue Buchstaben ins Gesichtsfeld zu bringen. Das Untersuchungszimmer verdunkelte man so weit, daß der durch eine innen geschwärzte Röhre auf die Papierfläche blickende Beobachter nach einer viertelstündigen Adaptation die Objekte noch eben als matte Punkte erkannte. Er gab an, wieviele der Zeichen er beim Überspringen eines elektrischen Funkens zugleich entziffern konnte. Aus der Größe und der gegenseitigen Entfernung der Buchstaben, sowie aus dem Abstand des Auges von der Tafel ließ sich die Ausdehnung des Netzhautbezirkes berechnen, in dem Objekte gewisser Größe erkennbar waren.

Weitere Versuche machten sie bei normaler Beleuchtung; sie rückten auf einer perimeterähnlichen Vorrichtung nacheinander verschiedene Kärtchen mit zwei schwarzen Punkten so lange von der Peripherie des Gesichtsfeldes zum Fixationspunkt hin, bis die beiden Punkte getrennt gesehen werden konnten.

A u b e r t und F ö r s t e r erhielten bei ihren Versuchen folgende Resultate:

- "1) Je weiter ein Buchstabe von der Augenachse entfernt ist, um so größer muß er sein, wenn er deutlich erkannt werden soll. Ebenso werden zwei nebeneinander liegende Punkte durch indirektes Sehen in desto größerer Entfernung seitlich von der Augenachse noch deutlich erkannt, je weiter sie voneinander entfernt sind.
- 2) Bei konstantem Gesichtswinkel der Buchstaben werden kleine nahe Buchstaben auf einem größeren Teil der Netzhaut erkannt, als große entfernte Buchstaben, d. h. die kleinen nahen Buchstaben werden besser erkannt, als größere entfernte.
- 3) Die Fähigkeit der Netzhaut, beide Punkte deutlich wahrzunehmen, nimmt in der Nähe vom Centrum langsamer, je weiter von ihm, um so schneller ab."

1873 untersuchte D o r seine Augen mit Hilfe von Snellenschen Buchstaben am de Wecker'schen Kampimeter; ein Teil seiner Ergebnisse ist in Tabelle 2 den Befunden späterer Untersucher gegenübergestellt.

L a n d o l t und I t o wiederholten die Experimente von A u b e r t und F ö r s t e r mit zwei schwarzen Quadraten auf weißem Grund, die in den Perimeterschlitten eingefügt wurden. Vier verschiedene Größen kamen zur Anwendung, wobei jeweils die Kantenlänge der Quadrate ihrem Abstand voneinander gleich war. Sie hatten damit die Möglichkeit, die Sehschärfe in einem Bereich von etwa 10° bis 30° Exzentrität in Stufen zu messen. Einen Teil ihrer Ergebnisse gibt Abb. 2 wieder.

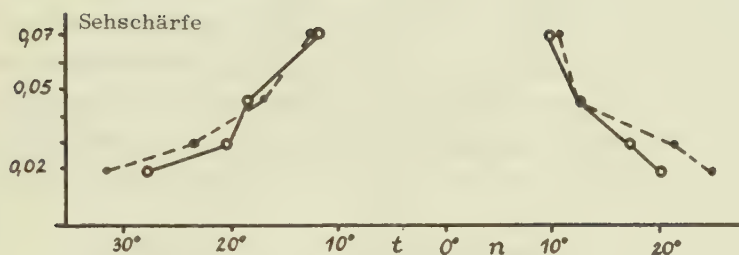


Abb. 2 (nach L a n d o l t und I t o)

Sehschärfe im horizontalen Gesichtsfeldmeridian

D o b r o w o l s k y und G a i n e ü b t e n in ihrer 1876 veröffentlichten Arbeit Kritik an den Versuchen von A u b e r t und F ö r s t e r :

"In den Versuchen mit den Buchstaben und Zahlen veränderten sie die Größe des Raumwinkels dadurch, daß sie die Objekte dem Auge näherten, resp. entfernten. Es ist klar, daß sie dabei leichter Fehler für die Größe des Raumwinkels erhalten konnten, als wenn sie, ohne den Abstand des Objektes vom Auge zu verändern, die Zeichen längs dem Bogen bewegt hätten.

Bei den Versuchen mit zwei Punkten veränderten A u b e r t und F ö r s t e r ganz willkürlich und unregelmäßig den Abstand zwischen beiden Punkten: bald gebrauchten sie verhältnismäßig kleine Punkte mit großem Abstände von einander, bald große Punkte mit kleinem Abstände. Es war durchaus nothwendig, die Größe der Punkte und ihren Abstand voneinander ganz regelmäßig, und zwar so zu ändern, daß die Größe der Punkte und ihr Abstand von einander immer in einem constanten Verhältnisse bleiben mußten. - Außerdem mußten sie, um genaue Resultate zu erhalten, vor Allem den kleinsten Gesichtswinkel für das

Centrum bestimmen und zwar nach derselben Methode, welche sie für das peripherische Sehen anwandten, um eine Einheit zu bekommen, mit welcher sie das peripherische Sehen vergleichen konnten. Da sie die Bestimmung der centralen Sehschärfe bei denselben Versuchsbedingungen unterlassen haben, so bleibt es ungreiflich, mit welcher Größe sie die von ihnen erhaltenen Resultate verglichen haben."

Ihre eigenen Versuche machten *Dobrowolsky* und *Gainé* mit Hilfe eines Förster'schen Perimeters, auf dem sie Buchstaben und Ziffern der Snellen'schen Schriftproben von außen zum Zentrum hin so lange verschoben, bis sie von der Versuchsperson erkannt wurden. In ihrer Tabelle Nr. I gaben sie die Ergebnisse ihrer Messungen bei vier ungeübten Probanden wieder. Die Tabelle enthält jedoch nur jeweils drei Einzelwerte (entsprechend drei verwendeten Buchstabengrößen) für die vier untersuchten Halbmeridiane des Gesichtsfeldes (außen, innen, oben, unten). Wie groß die individuellen Schwankungen und die der Versuchspersonen (V. P.) untereinander waren, zeigt ein Auszug aus dieser Tabelle für den äußeren Halbmeridian:

Tabelle 1 (nach *Dobrowolsky* und *Gainé*)

Nr. der Buchst.	LXX	XL	XX
Sehschärfe	1/70	1/40	1/20
V. P. 1 re	35° - 30°	33° - 25°	30° - 15°
li	30° - 25°	30° - 18°	25° - 15°
V. P. 2 re	22° - 10°	20° - 9°	8° - 5°
li	21° - 10°	20° - 10°	11° - 8°
V. P. 3 re	38° - 30°	30° - 22°	22° - 15°
li	35° - 30°	28° - 22°	23° - 17°
V. P. 4 re	34° - 28°	25° - 20°	22° - 10°
li	36° - 28°	28° - 22°	25° - 20°

Die Ergebnisse feinerer Messungen teilten *D o b r o w o l s k y* und *G a i n e* von drei Augen mit, und in der Zusammenfassung ihrer Resultate berichteten sie unter anderem:

"Die größte Abnahme der Sehschärfe findet am gelben Fleck selbst statt. Weiter zur Peripherie geht die Abnahme gleichmäßiger und an der äußersten Peripherie endlich wieder schneller vor sich.

Zu der entgegengesetzten Behauptung haben *A u b e r t* und *F ö r s t e r* kein Recht, da sich in ihren Tabellen gar keine Hinweise auf die Sehschärfe in der nächsten Umgebung des Centrums finden."

Allgemeine Anerkennung (*L o w*) fand die sorgfältige und präzise Arbeit von *W e r t h e i m* (1894). Im Selbstversuch ermittelte er die Sehschärfe in sechzehn Halbmeridianen des Gesichtsfeldes in Intervallen von 5° . Er untersuchte mit Gittern von schwarzen Drähten, deren gegenseitiger Abstand ihrem Durchmesser gleich war; fünf Drahtstärken kamen zur Anwendung. Auf einer zwei Meter langen Bahn glitt ein Schlitten mit einem Halter für das Gitter. Dieses hob sich von einer Milchglasplatte ab, die in die vordere Wand eines lichtdicht schließenden Kastens eingelassen und von einer im Kasten brennenden Gasflamme erhellt war. Durch Drehen des Gitters konnte den Drähten, die als schwarze Linien erschienen, jede Neigung gegeben werden. Das Gitter wurde dem Auge so nahe gebracht, daß die Richtung der Drähte gerade erkannt werden konnte. Die Bahn für den Schlitten ließ sich weiterhin in eine beliebige, zur Augenachse des Beobachters radiäre Stellung bringen. Um dem peripheren und dem Fixationsobjekt jedesmal gleichen Abstand vom Auge zu erhalten, aber andererseits die Bahnen der Objekte bei der Untersuchung der zentralen Netzhaut nicht kollidieren zu lassen, diente als Fixierpunkt das virtuelle Bild eines in einem Spiegel gesehenen Leuchtpunktes. Diesen lieferte die kleine Öffnung in der

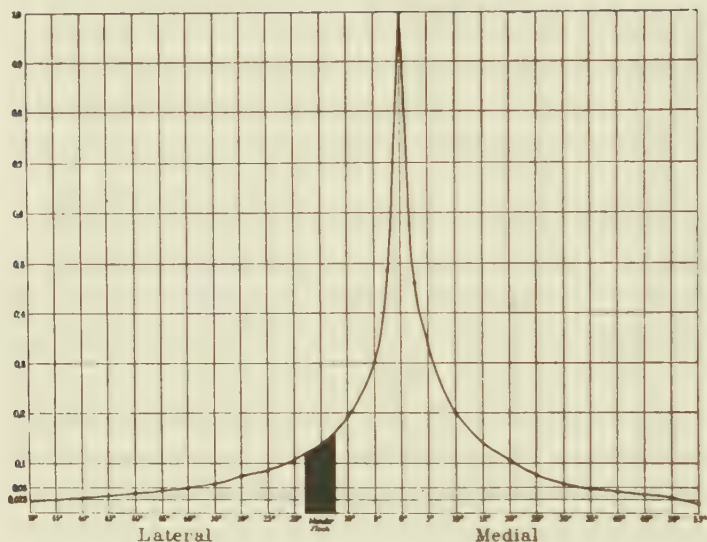


Abb. 3 (nach Wertheim)

Relative Sehschärfe im horizontalen Meridian

Wand eines von innen erhellen Blechkästchens, das auf einer Bahn seitlich hinter dem Beobachter glitt und mit dem Objektschlitten durch einen Schnurlauf verbunden war. Die Versuche wurden im Dunkelmzimmer durchgeführt.

Wertheim fand, daß die Ausdehnung des benutzten Objektes bei gleicher Drahtstärke für seine Sichtbarkeit nicht ohne Bedeutung sei. Je größer das Drahtgitter war, d. h. eine je größere Netzhautfläche gereizt wurde, desto höher stieg die periphere Sehschärfe. Aus diesem Grunde wurden die vier Objekte geringster Drahtstärke mit einer Blende bedeckt, deren runder Ausschnitt zu der Dicke der

Drähte jedesmal in demselben Größenverhältnis stand. Das fünfte Gitter wurde dem Auge als Ganzes dargeboten, da hierbei das entsprechende Verhältnis schon gegeben war.

Bei der Auswertung seiner Versuche setzte *Wertheim* die zentrale Sehschärfe gleich 1 und gab die Werte für die Peripherie in Bruchteilen davon an. Seine Ergebnisse für den horizontalen Gesichtsfeldmeridian zeigt die Abb. 3.

Köster (1896) und *Fick* (1898) berichteten über Messungen an vier Augen mit einem U-Haken (Abb. 7).

1903 fand *König*, daß die Sehschärfe abhängig ist von der Farbe und der Intensität des verwendeten Lichtes. Er maß die Sehschärfe seiner eigenen Augen mit verschiedenen großen Snellen'schen E-Haken (siehe Abb. 1 und 6).

Ruppert (1908) untersuchte wiederum mit Snellen'schen Buchstaben; ein Teil seiner Resultate ist in der vergleichenden Tabelle 2 wiedergegeben.

Tabelle 2: Vergleich der gemessenen Sehschärfen bei

	Dor	Wertheim	Ruppert
5°	1/4	1/3	1/3
10°	1/15	1/5	1/5
20°	1/40	1/10	- -
30°	1/70	1/14	1/25
40°	1/200	1/20	1/42

In dieser Tabelle fällt auf, daß die von *Dor* ermittelten Werte weit unter denen der beiden anderen Forscher liegen. Als Grund dafür lassen sich ungünstige Beleuchtungsverhältnisse in Verbindung

mit mangelnder Übung vermuten, denn über beides macht D o r in seiner Arbeit keine Angaben.

L u d v i g h (1941) erhielt bei seinen Sehschärfenmessungen bei drei Probanden für die zentrale und parazentrale Sehschärfe Ergebnisse, die zahlenmäßig gegenüber denen der anderen Forscher auffällig hoch sind (siehe Abb. 4).

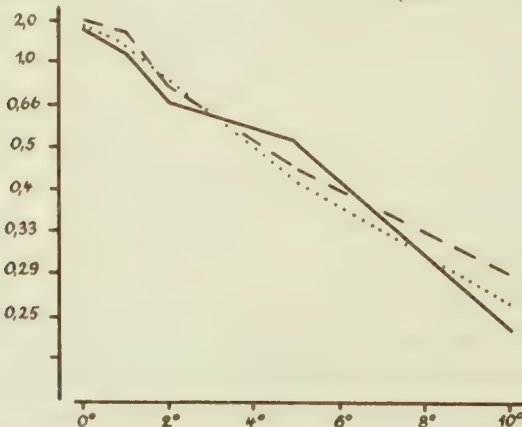
Dies ist wohl auf seine Versuchsdurchführung zurückzuführen. Er benützte fünf Snellen'sche Buchstaben (F, E, C, L, T) und schrieb dazu:

"Die Sehschärfe wurde willkürlich bestimmt in Abhängigkeit von der Größe der Buchstaben, die benötigt wurden, um 60% richtige Entscheidungen zu erzeugen. Wenn der Buchstabe keine klare Perzeption beim Betrachter hervorrief, war er angewiesen, zu raten, welcher der fünf Buchstaben es war."

Im Gegensatz zu L u d v i g h versuchten alle anderen Autoren, das Erraten des Sehzeichens auszuschalten und bauten fast alle ihre Ergebnisse auf 100% richtigen Angaben auf.

Sehschärfe

Abb. 4 (nach L u d v i g h)



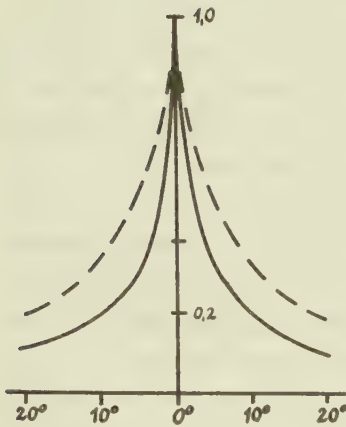


Abb. 5 (nach M o n j é)

Die Sehschärfe

— bei Dauerdarbietung

--- bei kurzzeitiger Darbietung des Sehzeichens

1949 untersuchte M o n j é die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Darbietungszeit. Er fand, daß mit kurzzeitiger Belichtung (0,5 - 1 sec) der Sehzeichen höhere Sehschärfen gemessen werden konnten, als bei Dauerdarbietung (siehe Abb. 5).

W e y m o u t h , der nach mathematischen Gesetzmäßigkeiten der Netzhautfunktionen forschte, untersuchte 1958 die Sehschärfe von zwanzig Augen. Er fand, daß das Auflösungsvermögen (als kleinster Winkel, unter dem die Objekte erkannt werden konnten) im Bereich von 0° bis etwa 25° eine lineare

Funktion der Exzentrizität ist. Das Gesichtsfeld eines Auges wurde bis zu einer Exzentrizität von 80° ausgemessen. W e y m o u t h schrieb, daß die Mittelwerte der kleinsten Sehwinkel in den vier Meridianen in linearer Funktion von der Exzentrizität bis 80° abhängig sind. Er versuchte auch, die Ergebnisse von W e r t h e i m in diese Funktion zu bringen, was allerdings für größere Exzentrizitäten nicht gelang.

A u l h o r n (1964) gebrauchte als Sehzeichen regelmäßige Vierecke und bestätigte durch ihre eigenen Versuche die Ergebnisse von W e r t h e i m .

Ähnliche Beobachtungen machten auch R a n d a l l und Mitarbeiter, die 1966 bei 27 Augen die Sehschärfe im horizontalen Gesichtsfeldmeridian von 0° bis nasal 20° ermittelten. Sie verwendeten dazu den Landolt-Ring, der stufenweise vergrößert den Versuchspersonen (u. a. auch Brillenträger) dargeboten wurde.

Die differierenden Ergebnisse der einzelnen Autoren resultieren wohl hauptsächlich aus der Verschiedenheit ihrer Untersuchungsmethoden, denn jede kleine Veränderung am Sehzeichen, der Beleuchtungsintensität und -dauer oder der anderen oben (3. 1. bis 3. 6.) beschriebenen Faktoren hat Einfluß auf die zu messende Sehschärfe.

5. Sehzeichen

Aus der auf Seite 4 aufgeführten Definition ergibt sich für ein Testzeichen zur Messung der Sehschärfe, daß es aus mindestens drei Flächen bestehen muß: Zwei gleichen und einer von ihnen eingeschlossenen dritten, welche dieselbe Größe, doch eine andere Helligkeit besitzt. Bei überschwelliger Größe wird dann die mittlere Fläche gegen den Helligkeitskontrast der beiden äußeren aufgelöst; bei Unterschwelligkeit zerfließen sie ineinander zu einer homogenen Lichtempfindung für die Gesamtfläche.

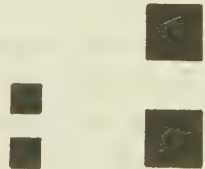
A u b e r t und F ö r s t e r verwendeten zwei runde schwarze Punkte auf weißem Grund, wobei das Verhältnis von Größe und Entfernung der Punkte voneinander willkürlich verändert wurde. Bei ihren Angaben über die gemessene Sehschärfe berücksichtigten sie nur den gegenseitigen Abstand der Punkte. H o f m a n n

zeigte jedoch durch einen einfachen Versuch, daß auch die Größe der Punkte von entscheidender Bedeutung ist: Große Punkte wurden leichter getrennt erkannt als kleinere Punkte des gleichen Abstandes voneinander.

Das Sehzeichen von L a n d o l t und I t o war insofern verbessert, als bei seinen quadratischen Punkten Kantenlänge und Entfernung gleich waren.

H o f m a n n schrieb bezüglich dieser Art von Testobjekten folgendes:

"Wenn man die eben merkliche Sonderung zweier kleiner Flächen feststellen will, sieht man zu allererst einen durch die Verschmelzung der beiden Flächen entstandenen, verwaschen begrenzten, einheitlichen Fleck. Dieser wird mit der Vergrößerung des Gesichtswinkels allmählich länglich, erhält dann



eine leichte Einbuchtung von der Seite her, die immer tiefer und tiefer eingreift, bis schließlich die Trennung eine durchgehende ist, womit die eigentliche Grenze des Auflösungsvermögens gefunden ist. Wird aber dem Beobachter die Frage gestellt, ob ein oder zwei Punkte vorliegen, so kann er die Entscheidung schon treffen, wenn er sich an die erste leichte Einbuchtung hält. Günstiger liegen die Verhältnisse, wenn dem Beobachter mehrere parallele gerade Striche dargeboten werden und er anzugeben hat, welche Richtung sie besitzen. Man sieht zwar auch da zunächst eine verwaschene Schattierung des Grundes, und man lernt es, aus diesen verschwommenen Umrissen die Richtung der Striche merklich eher zu erraten, als man sie wirklich scharf getrennt sieht. Aber der Unterschied zwischen diesem ersten Erraten und dem wirklichen Erkennen der Sonderung der Striche ist hier nicht groß, und es hält nicht schwer, die Grenze anzugeben, von der an man die parallelen Striche deutlich gesondert sieht. Insofern sind also für Sehschärfenbestimmungen parallele gerade Striche den Punkten vorzuziehen."

Bei Messungen an vielen Versuchspersonen ist es günstig, mehrere verschiedene Sehzeichen in unregelmäßiger Reihenfolge darzubieten, um ein Erraten oder durch die Erwartung eines bestimmten Sehzeichens nur eingebildetes Erkennen durch die falsche Aussage des Probanden zu entlarven.

Daher arbeiteten viele Autoren (u. a. D o b r o w o l s k y und G a i n e , L u d v i g h) mit Buchstabensehzeichen der Snellen'schen Schriftproben. Die Stichdicke dieser Buchstaben entspricht einem Fünftel ihrer Größe.

Obwohl diese Buchstaben für die ärztliche Praxis unentbehrlich sind, haben sie einen Nachteil: Sie sind bei gleicher Größe unterschiedlich leicht lesbar. D r e y e r und auch L e b e n s o h n



Abb. 6a
E-Haken
nach Snellen

geben an, daß die Lesbarkeit von z. B. "L" und "B" um rund 25% verschieden ist. Daher wählte Sloan bei der Zusammenstellung ihrer Sehprobentafel nur zehn Buchstaben aus, deren Lesbarkeit nur um etwa 12% differierte.

Doch auch dieser Unterschied in der Lesbarkeit reicht aus, Buchstabensehzeichen für exakte Untersuchungen der Sehschärfe unbrauchbar zu machen (Adler, Wertheim).



Abb. 6b
E-Haken
nach Pflüger

Mit dem E- und dem U-Haken (verwendet von Köster) ebenso wie mit dem Landolt-Ring (benützt von François) lassen sich durch Drehung jeweils vier oder mehr untereinander durchaus kommensurable Sehzeichen herstellen. Jedoch liegen die damit ermittelten Werte für die Sehschärfe etwas zu hoch, da es verhältnismäßig leicht ist, schon aus der Verteilung von Hell auf der einen und von Dunkel auf der anderen Seite des verwaschenen Bildes unterschiedlicher Größe die Richtung des Sehzeichens zu erkennen (Hofmann).



Abb. 7
U-Haken

Die von Wertheim verwendeten Gitter entbehren dieser Nachteile; doch beeinflussen sie aufgrund ihrer Größe (der Durchmesser des Gitters entspricht der zehnfachen Drahtstärke) positiv die gemessenen Absolutwerte für die Sehschärfe (siehe 3.4.). Außerdem ragt ein Gitter dieser Größe sowohl zum Zentrum als auch zur Peripherie über die Stelle des Gesichtsfeldes hinaus, deren Sehschärfe gerade bestimmt werden soll. Bei Messung der peripheren



Abb. 8
Landolt-
Ring

Sehschärfe kann die Stellung des Gitters an dem zum Fixationspunkt weisenden Segment, also in einem Bereich relativ höherer Sehschärfe, erkannt werden.

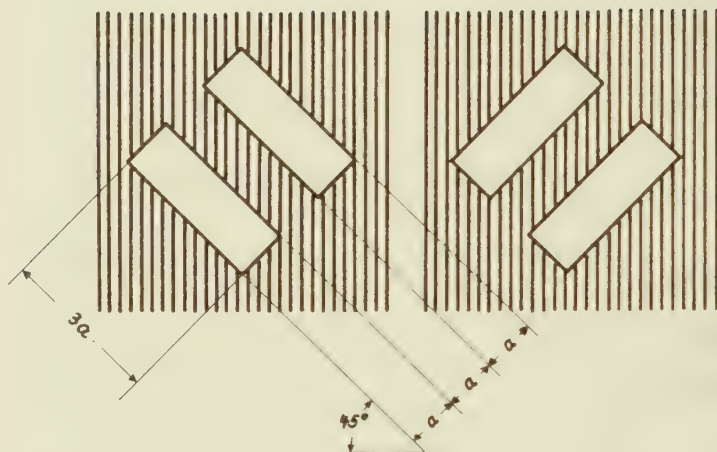


Abb. 9 : Das im experimentellen Teil dieser Arbeit verwendete Sehzeichen

Die neueren Methoden zur objektiven Sehschärfenprüfung auf der Basis des optokinetischen Nystagmus (Goldmann, Tojo) lassen sich nur zur Ermittlung der Sehschärfe im Gesichtsfeldzentrum verwenden.

Das im experimentellen Teil dieser Arbeit verwendete Sehzeichen ist in seiner Größe so weit reduziert, daß es gerade noch die auf Seite 17 gestellten Forderungen erfüllt: Ein Quadrat, das in drei flächengleiche parallel liegende Rechtecke aufgeteilt ist; die beiden äußeren Rechtecke sind heller als das mittlere.

Dieses Zeichen wird in zwei Stellungen dargeboten: Bei der ersten zeigt die lange Seite der Rechtecke von rechts unten nach links oben, bei der zweiten von links unten nach rechts oben (siehe Abb. 9).

6.1. Versuchsanordnung

Unter Tageslichtbedingungen wird das Sehzeichen mit einem Bildwerfer eigener Konstruktion auf eine 5 m vom Auge der Versuchsperson entfernte weiße Wand projiziert.

Die Versuchsgeräte sind so gewählt und zusammengestellt, daß dem auf Fernsicht eingestellten Auge des Probanden das stufenlos vergrößerbare Sehzeichen in gleichbleibendem Abstand und jeweils bei konstanter Exzentrizität dargeboten wird. Das Licht durchläuft dabei innerhalb einer horizontalen Ebene folgende Stationen, die noch einzeln besprochen werden:

- 1) Lichtquelle mit Kondensor
- 2) Sehzeichenblende
- 3) Linsensystem mit veränderlicher Brennweite (Gummilinse)
- 4) Umlenkspiegel
- 5) weiße Projektionswand
- 6) Auge der Versuchsperson

6.2. ad 1) : Als Lichtquelle dient ein Lichtkoagulator (Fa. Carl Zeiss, Oberkochen), bei dem der Tubus abgenommen wurde. Diese starke Lichtquelle ist erforderlich, um ein Sehzeichen zu projizieren, dessen Helligkeit optimal für die Sehschärfe ist. K ö n i g fand, daß die Sehschärfe mit der Beleuchtungsintensität bis etwa 1000 lx wächst, dann bis etwa 64000 lx gleich bleibt und bei noch höheren Intensitäten infolge Blendung wieder absinkt. Mit der hier verwendeten Lichtquelle werden Sehzeichen mit einer Beleuchtungsintensität zwischen 2000 lx und 3500 lx projiziert; die Projektionswand reflektiert davon ca. 73%. Die Helligkeit der Lampe kann am Gerät mit einem Stufenschalter verändert werden.

6.3. ad 2) : Von der Blende wird ein Bild projiziert, das als Sehzeichen dient. Die aus geschwärztem Metall gefertigte Blende hat

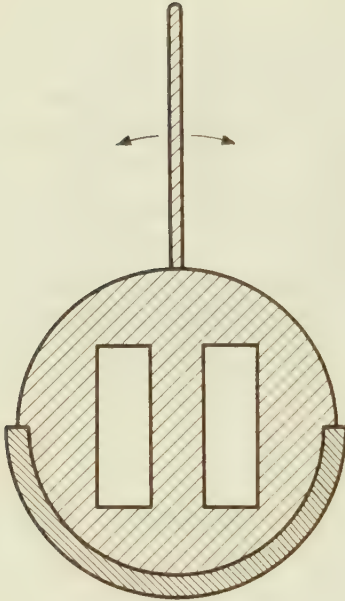


Abb. 10 : Sehzeichenblende

zentral ein quadratisches Loch, das durch einen darüber montierten Metallstreifen in zwei Rechtecke geteilt wird; Steg und Rechtecke haben gleiche Breite. Drei Blenden verschiedener Größe werden verwendet; ihre Stegbreiten verhalten sich wie 1, 17 : 2, 9 : 9, 3. Der äußere Umfang der drei Blenden ist gleich groß und kreisrund. Jeweils die gewünschte wird in den Strahlengang gebracht durch Einstecken in eine dafür vorgesehene Halterung, in der die Blende mittels eines an ihren Umfang angelöteten Stieles so gedreht werden kann, daß die beiden in ihrer Stellung verschiedenen Sehzeichen von ihr gebildet werden (siehe Abb. 9).

Die senkrechte und die waagerechte Stellung der Sehzeichenblende wurden vermieden wegen des physiologischen Astigmatismus der Hornhaut (Müller-Limmroth), der die senkrechte Stellung leichter erkennen ließe als die waagerechte.

6.4. ad 3) : Die Blende steht in der Gegenstandsebene eines aus zwei Vario-Objektiven (I: Schneider-Variogon 1 : 1,8 / 6 - 60 II: Schneider-Variogon 1 : 2 / 16 - 80) zusammengesetzten Linsensystems. Durch Bedienung des blendenwärts gerichteten Vario-Objektives I wird das Sehzeichen stufenlos vergrößert; außerdem wird durch die eingebaute Irisblende bei sehr kleinen Sehzeichen ein Teil des Lichtes ausgeblendet (siehe Tabelle 3). Am Bedienungshebel

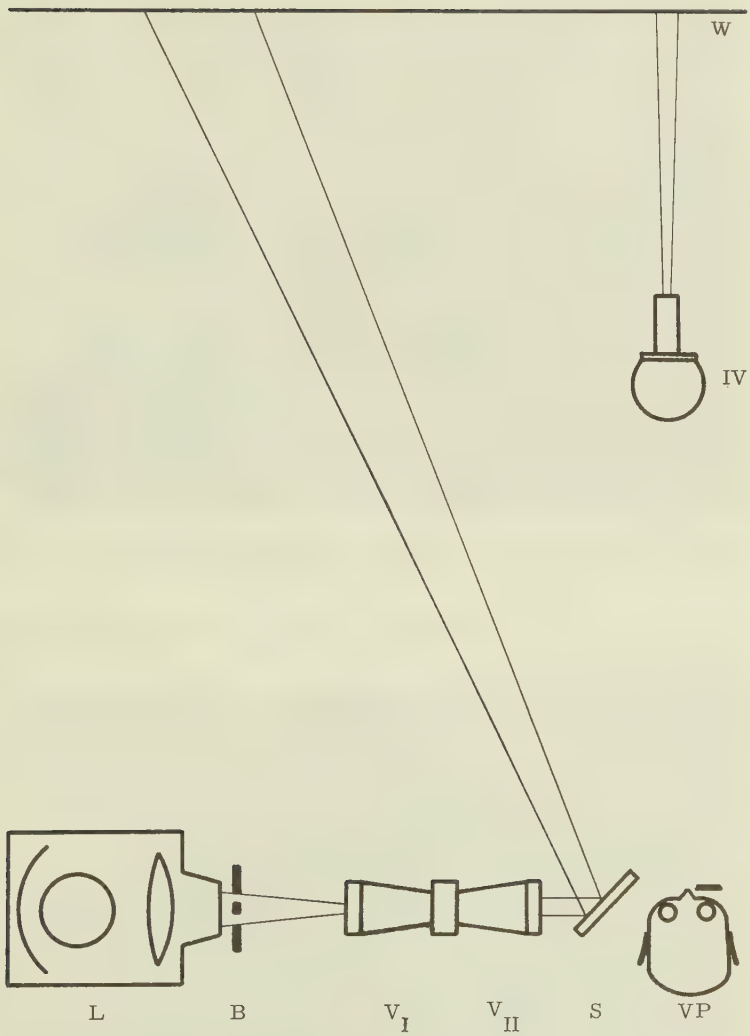


Abb. 11 : Versuchsanordnung, von oben gesehen

L = Lichtquelle B = Sehzeichenblende V_I = Vario-Objektiv I
 V_{II} = Vario-Objektiv II S = Umlenkspiegel
 VP = Versuchsperson IV = Idem-Visus-Gerät

ist ein feiner Zeiger angebracht, mit dessen Hilfe auf einer aufgeklebten Eichskala die Vergrößerung abgelesen wird, die der jeweiligen Stellung des Hebels entspricht. Die Eichskala des zweiten Vario-Objektives (II) hat nur zwei Marken: "1x" und "2x", da ihre Vergrößerungskraft für die unten beschriebenen Messungen nicht voll ausgenützt zu werden braucht.

Die optische Achse des bisher beschriebenen Gerätes steht parallel zur Projektionswand.

6.5. ad 4) : Nach Verlassen des Linsensystems treffen die Lichtstrahlen auf einen schräggestellten Spiegel (Oberfläche versilbert, optisch eben) und werden zur Bildwand hin reflektiert. Durch Drehen des Spiegels um seine vertikale Achse wird das Bild zu verschiedenen Stellen einer horizontalen Linie auf der Wand projiziert; dadurch wird ein Verrücken des übrigen Gerätes vermieden.

6.6. ad 5) : Als Projektionsfläche dient eine konturlose weiße Wand mit einem Reflexionskoeffizienten von 0,73, d.h. sie reflektiert ca. 73% des auf sie fallenden Lichtes. Sie ist in ihrer ganzen Fläche mit einer Beleuchtungsintensität von 70 lx bis 90 lx angestrahlt. Durch die große Helligkeit des Untersuchungszimmers wird vermieden, daß die Versuchsperson dunkeladaptiert und dann durch das besonders helle Sehzeichen geblendet wird.

Das projizierte Sehzeichen fällt auf eine gedachte waagerechte Linie, in der kaum sichtbare weiße Marken für die verschiedenen Winkel der Exzentrizität auf die Wand geklebt sind. Auf die Marke 0° in der Mitte der Linie wird mit einem Idem-Visus-Gerät ein kleines grünes Kreuz projiziert; dieses dient als Fixationspunkt für den Probanden bei Messung der peripheren Sehschärfe.

6.7. ad 6) : Unmittelbar neben dem Umlenkspiegel befindet sich der Kopf des Probanden; dadurch wird die Verzerrung des Sehzeichens

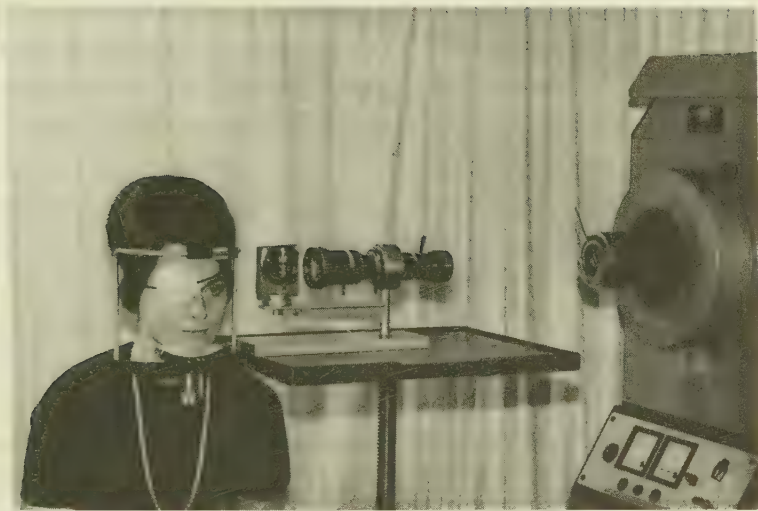


Abb. 12 : Versuchsanordnung

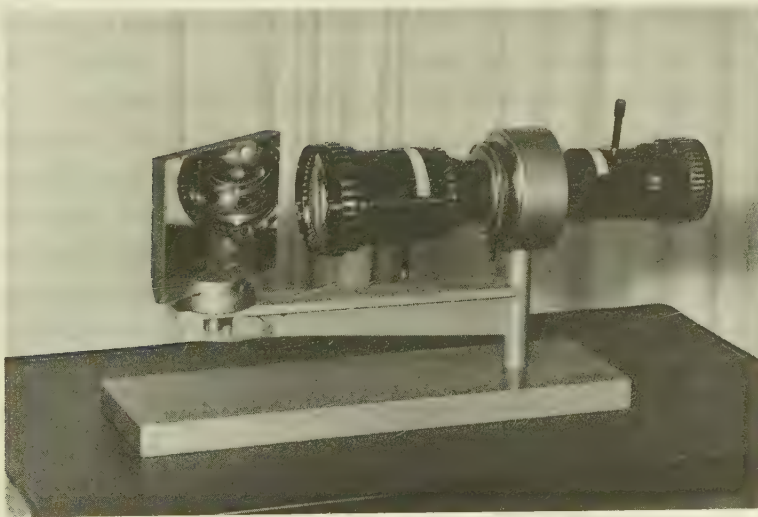


Abb. 13 : Das Kernstück des optischen Gerätes
(Vario-Objektive und Umlenkspiegel)

auf der in ihren seitlichen Teilen schräg bestrahlten Wand für das untersuchte Auge praktisch aufgehoben. Die Versuchsperson sitzt bequem auf einem Stuhl; ihr Kopf ist durch eine Kinn-Stirn-Stütze so fixiert, daß das Auge 5 m senkrecht von der 0^0 -Marke auf der Projektionswand entfernt ist.

Projektionsstrahlengang, Fixationspunkt und das Auge des Probanden liegen in einer horizontalen Ebene.

7. U n t e r s u c h u n g s g u t

Zur Untersuchung kamen 25 emmetrope Augen von 8 Studentinnen und 17 Studenten im Alter von 21 bis 28 Jahren; die Altersgrenzen wurden möglichst beschränkt, da die Sehschärfe mit zunehmendem Alter sinkt (S c h o b e r). Es wurden nur solche Versuchspersonen angenommen, bei denen ein Auge mindestens einen zentralen Visus von 6/5 (mit Pflüger-Haken gemessen) erreichte. Bei jeder Versuchsperson wurde nur ein Auge untersucht, jeweils dasjenige mit dem höheren Visus. Bei Gleichwertigkeit beider Augen wurde grundsätzlich das rechte Auge geprüft.

An die Aufmerksamkeit und das Konzentrationsvermögen der Probanden wurden hohe Ansprüche gestellt: Während ca. eineinhalb Stunden wurden etwa 120 erforderliche Einzelmessungen vorgenommen. Bei jeder Bestimmung im peripheren Gesichtsfeld mußte die Versuchsperson 3 bis 10 Sekunden ohne Lidschlag einen vorgeschriebenen Punkt starr fixieren und dabei das seitlich von diesem Punkt projizierte, langsam größer werdende Sehzeichen so früh wie möglich erkennen.

Jüngeren, wenig intelligenten und unruhigen Personen sind diese Fähigkeiten nicht gegeben (S c h o b e r), wie durch frühzeitig abgebrochene Versuche mit kindlichen und jugendlichen Probanden wie auch mit nervösen Erwachsenen festzustellen war.

8. Vorbereitungen zur Messung

Der Proband setzte sich vor die Kinn-Stirn-Stütze; sein nicht zu messendes Auge war okkludiert. Nun wurde ihm das Sehzeichen in beiden Stellungen stark vergrößert vorgeführt. Er wurde angewiesen, Stellung I (von links unten nach rechts oben) mit "rechts", Stellung II (von rechts unten nach links oben) mit "links" zu bezeichnen.

Dann wurden etwa 20 Übungsmessungen gemacht, bei denen die Versuchsperson lernte, das grüne Kreuz in der Mitte der Projektionswand ohne Lidschlag und Augenbewegung zu fixieren und dabei das weiter seitlich projizierte Sehzeichen zu erkennen. Sobald er die Stellung des langsam größer werdenden Sehzeichens erkannte, sagte er kurz "links" (bei Stellung II) oder "rechts" (bei Stellung I). Nur in äußerst wenigen Fällen gab er eine falsche Entscheidung; dann wurde die Übung etwas länger fortgesetzt.

Dazu ist zu bemerken, daß dies fünf bis zehn Minuten dauerte und in dieser Zeit eine eventuelle Erhöhung der peripheren Sehschärfe durch Übung (siehe 3.6.) weder hervorgerufen werden sollte noch konnte. Der Proband gewöhnte sich nur an das Sehzeichen und den Untersuchungsvorgang.

9.1. Messung

Zur Ermittlung der zentralen Sehschärfe wurde der Umlenkspiegel (6.5.) so eingestellt, daß die Projektionsstrahlen auf die Marke 0^0 der 5 m entfernten weißen Wand fielen; dazu wurden die aus Tabelle 3 hervorgehenden Einstellungen vorgenommen. Nun wurde mit dem Vario-Objektiv I (siehe Abb. 11 und 13) das Sehzeichen stufenlos vergrößert, bis der Proband, der das Zeichen fixierte, dessen Stellung mit "rechts" oder "links" angab. Die beiden Stellungen des Sehzeichens wurden in unregelmäßiger Reihenfolge dargeboten, sodaß das Urteil der

Versuchsperson nicht durch eine Erwartung beeinflusst wurde. Sobald der Proband "rechts" bzw. "links" sagte, wurde die entsprechende Einstellung des vergrößernden Vario-Objektives I auf seiner Eichskala abgelesen und protokolliert. Fünf Einzelmessungen ergaben den später verwendeten Mittelwert.

Im peripheren Gesichtsfeld wurden abwechselnd nasal und temporal die Werte für 1° , 2° , 3° , usw. (siehe Tabelle 3) durch jeweils drei Einzelmessungen ermittelt. Der Proband fixierte dabei ein kleines grünes Kreuz, das mit einem Idem-Visus-Gerät auf die Marke 0° in der Mitte der Bildwand projiziert wurde. Mit Hilfe des drehbaren Spiegels (6. 5.) wurde das Sehzeichen in Richtung der den gewünschten Gradzahlen entsprechenden Marken auf die Wand geworfen; die jeweiligen Einstellungen des optischen Systems sind aus Tabelle 3 zu entnehmen. Zu den Messungen über 25° hinaus wurde der Fixationspunkt verschoben, zunächst an den äußeren Rand der Projektionswand (Marke 25°) und bei Messungen über 50° auf die Seitenwand des Zimmers.

Äußerst selten wurde einmal die Stellung des Sehzeichens fasch angegeben; dann wurden in diesem Punkt drei zusätzliche Einzelmessungen vorgenommen.

Bei einer kleinen Anzahl der Versuchspersonen, die in der Gesichtsfeldperipherie eines größeren Sehzeichens als die übrigen bedurften, wurden die in Tabelle 3 in Klammern aufgeführten Einstellungen verwendet.

Die Versuchsprotokolle wiesen jetzt nur die von den Eichskalen der Vario-Objektive I und II abgelesenen Vergrößerungen und die Zahl der jeweils eingesetzten Sehzeichenblende auf. Die Vergrößerungszahlen zur Blende I wurden mit 1,17, die zur Blende II mit 2,9 und die zur Blende III mit 9,3 multipliziert. Die Resultate geben $1/3$ der Kantenlänge des Sehzeichens in Millimetern an, also die Breite des zwischen den hellen Teilen liegenden Streifens.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 aufgeführt.

T a b e l l e 3 : Einstellungen an den optischen Geräten

	Sehzeichen- blende	Iris- blende	Vario- Obj. II	Licht Stufe
0°	I	4	1x	I
1°	I	3,5	1x	I
2°	I	3	1x	I
3°	I	2,8	1x	I
5°	II	2,8	1x	I
7°	II	2,5	1x	I
9°	II	2	1x	I
12°	II	2	1x	I
15°	III	2	1x	I
20°	III	2	1x	I
25°	III	2	1x	I
30°	III	2	1x	I
40°	III	2	1x (2x)	I (II)
50°	III	2	1x (2x)	II
55°	III	2	2x	II (III)
60°	III	2	2x	III
70°	III	2	2x	III

Zu jedem untersuchten Punkt des horizontalen Gesichtsfeldmeridians wurden jeweils mehrere Messungen durchgeführt, um

1. Ungenauigkeiten der Ablesung von der Eichskala auszugleichen,
2. falsche Angaben der Versuchsperson (infolge Erratens oder nicht steter Fixation) auszuschließen und
3. Fehler zu verringern, die durch hin und wieder auftretende kurzzeitige Verminderung der Aufmerksamkeit hervorgerufen wurden.

Die Fehlerrechnung ergab eine Schwankung der Einzelwerte um maximal $\pm 2\%$.

Tabelle 4a: Bildgrößen in Millimeter

Proband	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0°	1,24	1,17	1,40	1,45	1,04	1,08	1,25	1,29	1,18	1,14	1,15	1,14	1,08
Nasale Gesichtsfeldhälfte													
1°	1,56	1,65	1,76	1,80	1,46	1,42	1,63	1,53	1,43	1,52	1,40	1,52	1,38
2°	2,01	2,22	2,22	2,45	2,07	2,00	2,10	2,07	1,88	2,04	1,99	1,97	1,97
3°	2,60	3,19	3,19	3,16	3,00	2,63	2,80	2,68	2,68	2,78	2,53	2,81	2,46
5°	3,91	4,15	4,14	4,76	3,80	4,12	4,29	4,31	4,41	4,47	4,15	3,97	4,15
7°	5,16	5,25	5,22	6,00	4,29	5,60	5,26	5,80	5,54	5,25	5,16	5,16	5,48
9°	5,97	6,15	6,87	6,93	5,86	6,90	6,90	7,02	6,35	6,70	6,44	6,38	6,90
12°	6,90	7,98	8,18	8,69	6,58	8,18	8,82	8,41	7,89	8,26	8,26	7,77	8,06
15°	8,03	10,7	10,2	10,9	7,54	10,2	10,7	10,8	9,89	9,24	10,6	9,80	9,54
20°	10,4	13,4	13,0	14,3	10,3	13,0	18,3	14,0	13,3	12,3	13,0	13,3	13,0
25°	16,8	19,9	17,2	19,0	15,6	16,8	22,8	18,3	17,5	17,1	16,9	17,8	16,6
30°	19,8	25,8	19,9	25,1	24,2	22,1	28,1	24,0	21,8	22,2	21,9	23,6	22,1
40°	32,1	36,6	30,2	34,4	37,8	32,6	38,4	37,9	32,3	36,6	37,0	37,2	36,9
50°	53,4	54,0	48,1	51,5	49,7	51,3	59,0	56,7	51,2	53,6	55,6	53,6	51,7
55°	57,7	74,8	61,0	59,9	67,0	72,0	80,0	75,3	63,2	72,4	74,8	83,1	70,1

T a b e l l e 4 b : Bildgrößen in Millimeter

Proband	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0°	1,23	1,24	1,19	1,35	1,16	1,39	1,00	1,36	1,31	1,10	1,12	1,21
Nasale Gesichtsfeldhälfte												
1°	1,66	1,67	1,67	1,66	1,51	1,93	1,36	1,73	1,69	1,44	1,41	1,68
2°	2,29	2,01	1,97	2,06	2,08	2,49	1,90	2,07	2,24	2,03	2,01	2,24
3°	2,97	2,76	2,50	2,84	2,67	3,10	2,22	3,10	2,82	2,66	2,48	3,19
5°	3,99	5,05	4,24	4,43	4,24	5,31	3,60	5,37	4,23	4,15	4,14	4,15
7°	6,00	6,58	5,51	6,50	5,45	7,60	4,90	7,69	5,68	5,63	5,69	5,24
9°	7,02	7,83	6,29	8,01	7,08	8,50	6,32	8,47	6,81	6,94	6,86	6,12
12°	8,76	10,2	8,35	10,1	8,85	12,9	8,26	9,80	8,41	8,21	8,10	7,96
15°	11,6	13,2	9,51	12,1	10,4	16,9	9,57	12,1	11,2	10,5	9,57	10,7
20°	19,7	19,7	12,8	21,4	13,7	24,4	12,4	20,0	18,1	13,3	13,1	13,4
25°	23,4	24,4	16,6	26,9	17,5	29,8	17,5	26,0	22,5	16,9	18,8	19,7
30°	28,2	31,8	22,0	35,5	24,2	33,7	25,4	34,1	29,0	22,4	22,3	25,4
40°	38,7	48,0	32,1	47,3	38,1	45,9	38,4	44,7	36,6	32,9	36,9	36,2
50°	53,4	63,8	54,5	71,2	72,0	63,8	66,4	57,1	51,7	51,6	51,7	53,8
55°	76,8	80,0	73,1	81,3	91,2	84,3	81,8	75,0	72,0	71,0	70,1	74,2

Tabelle 4 c: Bildgrößen in Millimeter

Proband	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Temporale Gesichtsfeldhälfte													
1°	1,50	1,73	1,71	1,79	1,45	1,40	1,63	1,57	1,51	1,52	1,40	1,52	1,38
2°	2,02	2,27	2,26	2,48	2,08	2,01	2,12	2,10	1,90	2,07	1,98	2,10	1,99
3°	2,54	3,22	3,31	3,31	3,00	2,66	2,79	2,74	2,69	2,78	2,54	2,81	2,47
5°	3,41	4,15	4,29	4,56	3,71	4,15	4,32	4,36	4,44	4,53	4,09	4,03	4,15
7°	5,16	5,13	5,15	5,84	4,29	5,57	5,51	6,03	5,57	5,31	5,19	5,16	5,66
9°	5,97	5,97	6,79	6,99	5,71	6,90	6,87	7,11	6,21	6,61	6,38	6,35	6,84
12°	6,90	7,80	8,44	8,12	6,61	8,32	9,35	8,69	7,77	7,89	8,35	7,72	7,54
20°	10,2	13,1	13,0	13,1	10,4	12,8	16,9	16,0	12,7	11,8	12,2	12,6	11,4
25°	15,4	17,9	16,0	16,8	14,0	16,7	19,7	20,3	16,5	16,0	15,6	16,0	15,2
30°	18,0	22,5	19,3	20,1	16,0	19,8	23,3	24,0	19,9	18,7	18,8	19,8	17,9
40°	23,1	30,5	30,7	35,1	19,3	25,6	35,8	33,5	24,6	24,1	24,9	24,8	24,2
50°	34,0	35,5	45,6	45,2	23,7	33,8	44,4	42,3	31,8	32,3	32,7	32,4	28,7
60°	43,3	44,7	56,5	55,1	33,8	42,6	48,4	48,9	41,5	44,6	43,9	41,3	46,1
70°	55,8	61,0	72,5	70,0	47,8	48,2	63,6	67,3	50,8	54,9	53,0	54,3	63,2

Tabelle 4 d: Bildgrößen in Millimeter

Proband	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Temporale Gesichtsfeldhälfte												
1°	1,66	1,67	1,67	1,67	1,51	1,92	1,36	1,72	1,69	1,43	1,40	1,61
2°	2,31	2,04	1,97	2,07	2,07	2,47	1,88	2,10	2,21	2,04	2,01	2,25
3°	2,97	2,78	2,49	2,84	2,66	3,09	2,20	3,18	2,80	2,67	2,49	3,20
5°	4,02	4,99	4,24	4,45	4,24	5,31	3,63	5,51	4,23	4,17	4,15	4,13
7°	5,94	6,65	5,45	6,41	5,39	7,54	4,93	7,49	5,64	5,60	5,66	5,71
9°	6,96	7,77	6,15	7,83	6,84	8,47	6,29	8,35	6,64	6,92	6,83	6,95
12°	9,47	11,5	8,12	9,92	8,35	11,7	7,89	10,6	8,34	8,35	7,99	8,58
20°	18,7	17,8	11,7	16,8	12,5	21,6	11,4	18,1	14,8	13,1	12,4	14,1
25°	20,4	19,9	13,3	21,0	16,4	25,5	16,7	21,9	17,5	17,0	17,0	18,2
30°	24,4	23,6	16,6	25,9	19,8	30,7	20,4	25,0	22,8	20,1	19,8	21,0
40°	28,4	35,0	20,4	33,3	25,6	36,8	29,9	31,8	32,1	25,9	24,2	28,6
50°	35,1	42,4	28,6	45,6	35,1	46,3	44,9	40,0	37,4	34,1	30,9	38,4
60°	50,6	58,2	42,2	67,5	54,5	65,1	55,8	54,9	48,9	42,9	45,8	49,2
70°	63,2	77,5	66,6	89,9	65,1	80,0	65,6	73,1	63,2	53,5	62,5	65,1

9.2. Aus den Tabellen 4a-d wurden nun die arithmetischen Mittelwerte ($\bar{b}$) der Bildgrößen (b) berechnet, dazu die Standardabweichung (s) und die Standardabweichung der Mittelwerte ($s_{\bar{b}}$).

T a b e l l e 4 e : Mittelwerte der Bildgrößen

	Nasale Gesichtsfeldhälfte			Temporale Gesichtsfeldhälfte		
	$\bar{b}$	s	($s_{\bar{b}}$)	$\bar{b}$	s	($s_{\bar{b}}$)
0°	1, 21 ± 0, 12 mm (0, 024)					
1°	1, 58 ± 0, 15 mm (0, 030)			1, 58 ± 0, 15 mm (0, 030)		
2°	2, 10 ± 0, 16 mm (0, 032)			2, 11 ± 0, 16 mm (0, 032)		
3°	2, 79 ± 0, 27 mm (0, 054)			2, 81 ± 0, 29 mm (0, 058)		
5°	4, 30 ± 0, 42 mm (0, 084)			4, 29 ± 0, 46 mm (0, 092)		
7°	5, 66 ± 0, 76 mm (0, 152)			5, 68 ± 0, 72 mm (0, 144)		
9°	6, 86 ± 0, 70 mm (0, 140)			6, 83 ± 0, 69 mm (0, 138)		
12°	8, 55 ± 1, 2 mm (0, 24)			8, 57 ± 1, 2 mm (0, 24)		
15°	10, 6 ± 1, 8 mm (0, 36)					
20°	14, 9 ± 3, 5 mm (0, 70)			14, 0 ± 2, 9 mm (0, 58)		
25°	19, 7 ± 3, 8 mm (0, 76)			17, 6 ± 2, 7 mm (0, 54)		
30°	25, 4 ± 4, 4 mm (0, 88)			21, 1 ± 3, 3 mm (0, 66)		
40°	37, 4 ± 4, 7 mm (0, 94)			28, 3 ± 5, 0 mm (1, 00)		
50°	56, 0 ± 6, 5 mm (1, 30)			36, 8 ± 6, 4 mm (1, 28)		
55°	73, 7 ± 8, 0 mm (1, 60)					
60°				49, 1 ± 7, 8 mm (1, 56)		
70°				63, 5 ± 10, 2 mm (2, 04)		

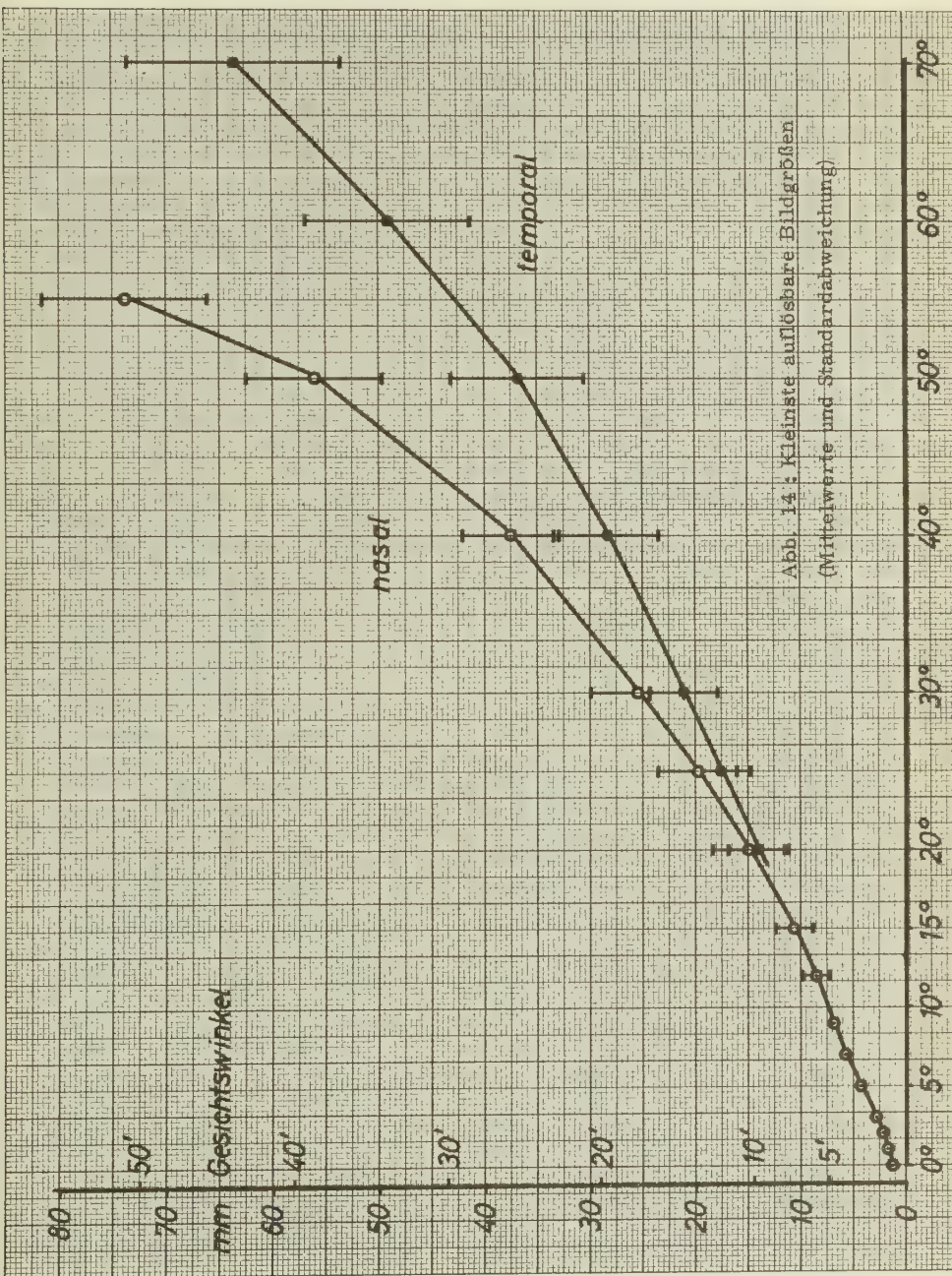
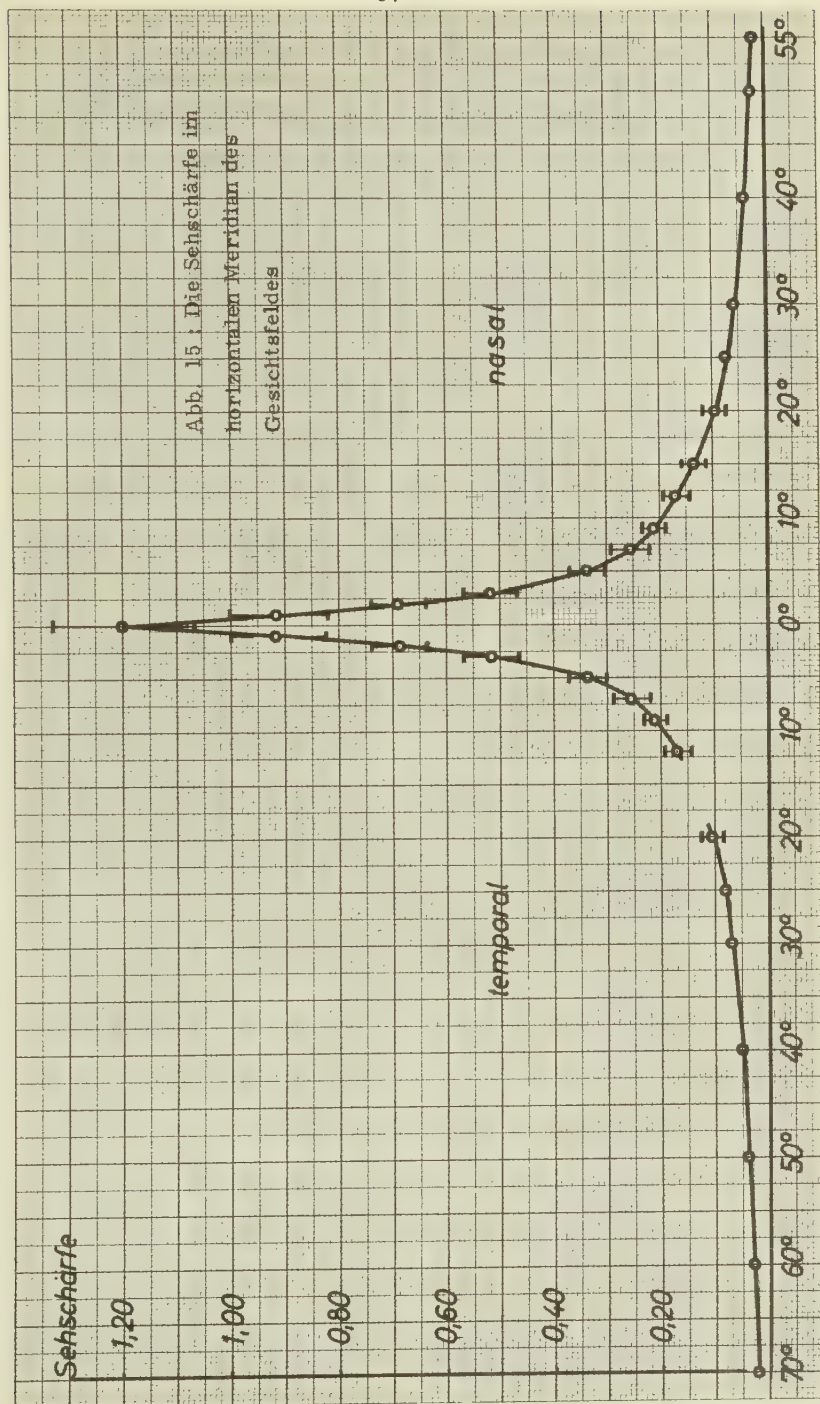


Abb. 14: Kleinste auflösbare Bildgrößen
(Mittelwerte und Standardabweichung)

9.3. Einem Gesichtswinkel von $1'$ (Sehschärfe = 1) entspricht bei einer Distanz von 5m ein Bogen von 1,45 mm. Zur Berechnung der Sehschärfe wurde der Quotient $1,45 \text{ mm} : \bar{b}$ gebildet. (In dem in Frage kommenden Bereich kleinster Winkel können Sehne und Bogen gleichgesetzt werden.)

T a b e l l e 5 : Mittelwerte der Sehschärfen ($\bar{a}$)

Nasale Gesichtsfeldhälfte				Temporale Gesichtsfeldhälfte			
	$\bar{a}$	s	$s_{\bar{a}}$		$\bar{a}$	s	$s_{\bar{a}}$
0°	1,20	± 0,12	(0,024)				
1°	0,918	± 0,086	(0,0172)		0,918	± 0,086	(0,0172)
2°	0,691	± 0,051	(0,0102)		0,688	± 0,051	(0,0102)
3°	0,520	± 0,049	(0,0092)		0,516	± 0,053	(0,0106)
5°	0,337	± 0,033	(0,0066)		0,338	± 0,036	(0,0072)
7°	0,257	± 0,034	(0,0068)		0,255	± 0,032	(0,0064)
9°	0,211	± 0,022	(0,0044)		0,212	± 0,021	(0,0042)
12°	0,170	± 0,024	(0,0048)		0,169	± 0,025	(0,0050)
15°	0,137	± 0,023	(0,0046)				
20°	0,0973	± 0,0226	(0,00452)		0,104	± 0,021	(0,0042)
25°	0,0736	± 0,0141	(0,00282)		0,0824	± 0,0128	(0,00256)
30°	0,0571	± 0,0100	(0,00200)		0,0688	± 0,0106	(0,00212)
40°	0,0388	± 0,0048	(0,00096)		0,0513	± 0,0090	(0,00180)
50°	0,0259	± 0,0030	(0,00060)		0,0394	± 0,0068	(0,00136)
55°	0,0197	± 0,0021	(0,00042)				
60°					0,0296	± 0,0047	(0,00094)
70°					0,0228	± 0,0037	(0,00074)



9.4. Da die in den Tabellen 4e und 5 aufgeführten Absolutwerte weitgehend von der Auswahl der untersuchten Augen abhängig sind, wurden die Relativwerte für Bildgröße und Sehschärfe berechnet. Diese rechnerische Umformung wurde an den Meßergebnissen in Tabelle 4a-d ausgeführt, wobei die bei den einzelnen Versuchspersonen ermittelten Werte durch die 0° -Bildgröße des jeweiligen Probanden dividiert wurde. Die Mittelwerte der so berechneten Größen sind in Tabelle 6 aufgeführt.

T a b e l l e 6 : Mittelwerte der relativen Bildgrößen ($\bar{b}'$)

Nasale Gesichtsfeldhälfte		Temporale Gesichtsfeldhälfte
0°	$1,00 \pm 0,00$ (0,000)	
1°	$1,31 \pm 0,06$ (0,012)	$1,30 \pm 0,06$ (0,012)
2°	$1,74 \pm 0,12$ (0,024)	$1,75 \pm 0,12$ (0,024)
3°	$2,29 \pm 0,19$ (0,038)	$2,33 \pm 0,20$ (0,040)
5°	$3,56 \pm 0,28$ (0,056)	$3,55 \pm 0,32$ (0,064)
7°	$4,68 \pm 0,47$ (0,094)	$4,70 \pm 0,46$ (0,092)
9°	$5,67 \pm 0,50$ (0,100)	$5,66 \pm 0,50$ (0,100)
12°	$7,07 \pm 0,80$ (0,160)	$7,09 \pm 0,83$ (0,166)
15°	$8,76 \pm 1,12$ (0,224)	
20°	$12,3 \pm 2,3$ (0,46)	$11,5 \pm 1,8$ (0,36)
25°	$16,2 \pm 2,3$ (0,46)	$14,6 \pm 1,7$ (0,34)
30°	$21,0 \pm 3,0$ (0,60)	$17,4 \pm 2,1$ (0,42)
40°	$31,1 \pm 4,1$ (0,82)	$23,3 \pm 3,1$ (0,62)
50°	$46,6 \pm 6,8$ (1,36)	$30,4 \pm 4,3$ (0,86)
55°	$61,9 \pm 9,3$ (1,86)	
60°		$40,5 \pm 5,3$ (1,06)
70°		$52,2 \pm 5,6$ (1,12)

9.5. Die Mittelwerte für die relative Sehschärfe ($\bar{a}'$) ergeben sich aus den Reziprokwerten von $\bar{b}'$ (Tabelle 6). Sie sind in Tabelle 7 festgehalten.

T a b e l l e 7 : Mittelwerte der relativen Sehschärfen ($\bar{a}'$)

Nasale Gesichtsfeldhälfte				Temporale Gesichtsfeldhälfte		
0°	1,00	± 0,00	(0,000)			
1°	0,764	± 0,004	(0,0008)	0,769	± 0,004	(0,0008)
2°	0,575	± 0,042	(0,0084)	0,572	± 0,042	(0,0084)
3°	0,436	± 0,036	(0,0072)	0,429	± 0,037	(0,0074)
5°	0,281	± 0,022	(0,0044)	0,282	± 0,025	(0,0050)
7°	0,214	± 0,021	(0,0042)	0,213	± 0,021	(0,0042)
9°	0,176	± 0,016	(0,0032)	0,177	± 0,016	(0,0032)
12°	0,141	± 0,016	(0,0032)	0,141	± 0,027	(0,0034)
15°	0,114	± 0,015	(0,0030)			
20°	0,0813	± 0,0152	(0,00304)	0,0870	± 0,0137	(0,00274)
25°	0,0617	± 0,0088	(0,00176)	0,0685	± 0,0082	(0,00164)
30°	0,0476	± 0,0068	(0,00136)	0,0575	± 0,0069	(0,00138)
40°	0,0322	± 0,0042	(0,00084)	0,0429	± 0,0057	(0,00112)
50°	0,0215	± 0,0031	(0,00062)	0,0329	± 0,0047	(0,00094)
55°	0,0162	± 0,0024	(0,00048)			
60°				0,0247	± 0,0032	(0,00064)
70°				0,0192	± 0,0021	(0,00042)

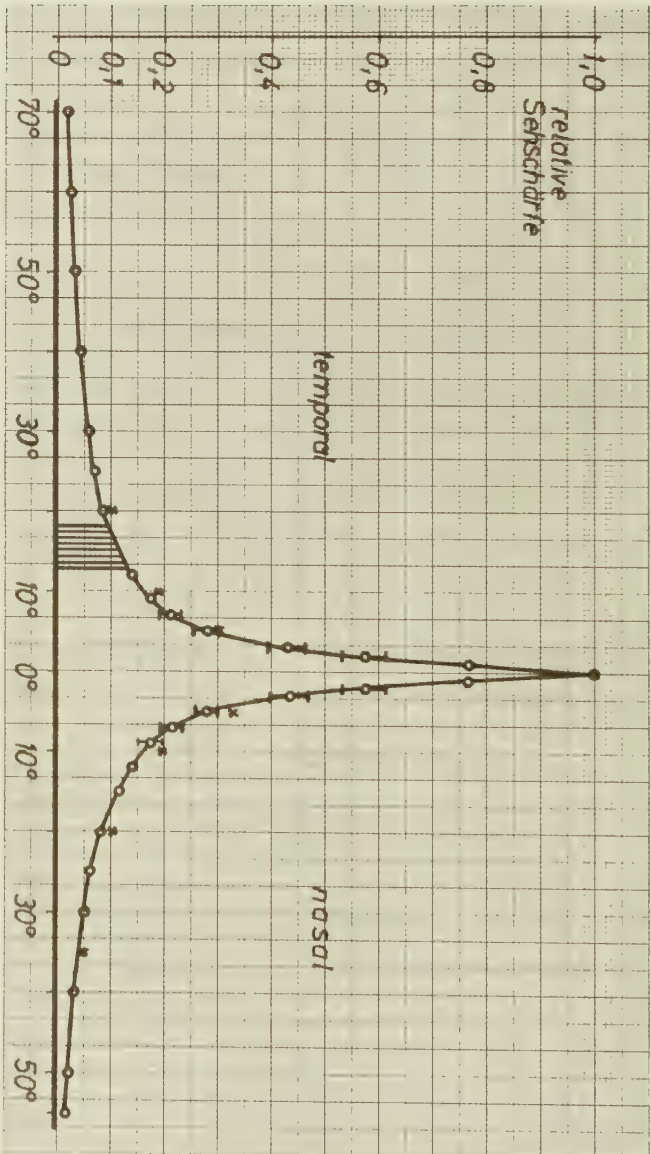


Abb. 16 : Die relative Sehschärfe im horizontalen Meridian des Gesichtsfeldes

o = Mittelwerte von 25 Augen (eigene Messungen)

x = Meßpunkte von Wertheim, soweit sie von den eigenen Ergebnissen abweichen

10. Diskussion der Meßergebnisse

Für den horizontalen Gesichtsfeldmeridian der hier untersuchten 25 normalsichtigen helladaptierten Augen lassen sich aus den vorliegenden Versuchsergebnissen folgende Feststellungen treffen:

- 1) Je weiter das Sehzeichen vom Zentrum des Gesichtsfeldes entfernt ist, desto größer muß es sein, um erkannt zu werden (siehe Abb. 14); d. h. die Sehschärfe nimmt vom Zentrum zur Peripherie des Gesichtsfeldes hin ab (siehe Abb. 15).
- 2) Die Abnahme der Sehschärfe ist in der Nähe des Gesichtsfeldzentrums am größten; zur Peripherie hin wird sie geringer (siehe Abb. 15).

Die Punkte 1) und 2) beinhalten Tatsachen, die lange bekannt sind und hier nur der Vollständigkeit halber nochmals aufgeführt werden.

- 3) Von 0° bis 15° Exzentrizität gleichen die kleinsten auflösbaren Bildgrößen des nasalen den des temporalen Halbmeridians. Weiter zur Peripherie hin nehmen sie im nasalen Bereich schneller zu als im temporalen; d. h. die Abnahme der Sehschärfe geschieht ab 15° Exzentrizität im nasalen Halbmeridian des Gesichtsfeldes rapider als im temporalen.

- 4) Die Kurve für den kleinsten auflösbaren Gesichtswinkel in Abhängigkeit von der Exzentrizität (Abb. 14) verläuft in einem Bereich von 0° bis ca. 40° temporal bzw. bis ca. 20° nasal nahezu gerade (linear).

Daraus ergibt sich: Der kleinste auflösbare Gesichtswinkel ist in diesem Bereich (von kleinen Schwankungen abgesehen) eine lineare Funktion des Winkels der Exzentrizität (mathematisches

Schema: $y = a x + b$); dies bedeutet für die Sehschärfe, daß sie eine einfache Reziprofunktion der Exzentrizität ist

(Schema: $y = \frac{a}{x} + b$).

5) Ein Vergleich mit den Untersuchungsergebnissen anderer Autoren zeigt, daß die gemessenen Absolutwerte sich stark unterscheiden (siehe z.B. L u d v i g h), da sie von der Meßmethode abhängig sind.

6) Vergleicht man hingegen die Relativwerte (zentrale Sehschärfe gleich 1 gesetzt), so ergibt sich eine weitgehende Übereinstimmung der Angaben einiger Autoren (besonders W e r t h e i m , A u l h o r n , W e y m o u t h) mit den in dieser Arbeit ermittelten Werten. Gegenüber den (schon von A u l h o r n bestätigten) Ergebnissen von W e r t h e i m zeigen sich nur kleine Unterschiede (siehe Abb. 16).

11. Gegenüberstellung von Sehschärfe und Struktur der Retina

Unter der Voraussetzung, daß das Auflösungsvermögen der gesamten Netzhaut auf gleichen Funktionsprinzipien beruht, ist zunächst zu erwägen, ob das reduzierte Sehvermögen der Netzhautperipherie sich durch mangelnde Übung begründen läßt.

Besonders Dobrowolsky und Gaine und Wertheim maßen der Übung des peripheren Sehens einen bedeutenden Einfluß auf die indirekte Sehschärfe bei. Sie gaben an, nach monatelanger Übung Steigerungen der peripheren Sehschärfe von 1 : 1,5 bis 1 : 10 gemessen zu haben. Jedoch machten die Autoren keine Angaben über Leuchtdichte und Kontrast der Testobjekte und über den Adaptationszustand des Auges, sodaß zu vermuten ist, daß die Konstanz der Untersuchungsbedingungen nicht gewährleistet war. Durch eine Änderung der Versuchsbedingungen konnten dann leicht Unterschiede bei der gemessenen Sehschärfe auftreten. Jedenfalls weichen die von Wertheim angegebenen Sehschärfenwerte (nach langer Übung) von den in dieser Arbeit unter optimalen konstanten Untersuchungsbedingungen ermittelten Ergebnissen (ohne Übung) nur unwesentlich ab (siehe Abb. 16).

Auch klinische Beobachtungen sprechen gegen einen Einfluß der Übung auf die periphere Sehschärfe. Bei exzentrisch fixierenden Augen ist die Übung für die exzentrische Fixationsstelle auf der Netzhaut als maximal anzusehen, doch zeigt sich selbst nach jahrelangem Bestehen einer konstanten exzentrischen Fixation (infolge Maculaerkrankungen und exakt festgelegten Zentralskotomen) kein nennenswerter Unterschied zwischen der Sehschärfe dieses exzentrischen Fixationspunktes und der Sehschärfe des entsprechenden Netzhautortes bei einem normalen Auge.

Oppel und Jorde zeigten bei 30 exzentrisch fixierenden schielamblyopen Augen, daß in keinem Fall die Sehschärfe des exzentrischen Fixationspunktes größer war als das Auflösungsvermögen

der entsprechenden Netzhautstelle eines normalen Auges.

Daraus ist zu folgern, daß die Übung des indirekten Sehens unter optimalen photopischen Untersuchungsbedingungen bei intelligenten Versuchspersonen nur geringe Bedeutung für die periphere Sehschärfe besitzen kann.

Der Hauptgrund für das Absinken der Sehschärfe vom Zentrum zur Peripherie des Gesichtsfeldes liegt in der unterschiedlichen anatomischen und funktionellen Struktur der verschiedenen Netzhautbereiche.

Da unter photopischen Bedingungen, wie sie bei den vorliegenden Versuchen bestanden, nur die Zapfen für das Sehen und die Sehschärfe verantwortlich sind, können bei der Gegenüberstellung von Auflösungsvermögen und Zahl der Photorezeptoren die Stäbchen außer Acht gelassen werden.

Nach O e s t e r b e r g beträgt die Gesamtzahl der Zapfen in einem Auge 6,3 bis 6,8 Millionen, deren Dichte pro Flächeneinheit vom Netzhautzentrum zur Peripherie rasch abfällt; dazu kommen 110 bis 125 Millionen Stäbchen. Dieser großen Anzahl von Sinneszellen stehen nur rund 1,2 Millionen Ganglienzellen und afferente Sehnervenfasern zur Verfügung (O p p e l). Daraus ergibt sich, daß jeweils mehrere Zapfen und (bzw. oder) Stäbchen zu einem Funktionsaggregat über eine gemeinsame Ganglienzelle und eine einzige afferente Fortleitung (Sehnervenfaser) zusammengefaßt sind.

Die Ausdehnung einer zusammengehörigen Zapfengruppe müßte aus dem Netzhautbild des an dieser Stelle auflösbaren Sehzeichens berechenbar sein. Hierbei bedeutet "Netzhautbild" die Breite der retinalen Abbildung eines der drei gleichen Streifen, aus welchen das Sehzeichen besteht (siehe Seite 20). Die aus Tabelle 4e berechneten Größen der Netzhautbilder an verschiedenen Punkten des temporalen Gesichtsfeldmeridians sind in Tabelle 8 aufgeführt (Berechnungsgrundlage: Gesichtswinkel $1'$ entspricht nach G u l l s t r a n d $4,85 \mu$ auf der Netzhaut). Darunter wurden die Werte der linearen Zapfenverteilung

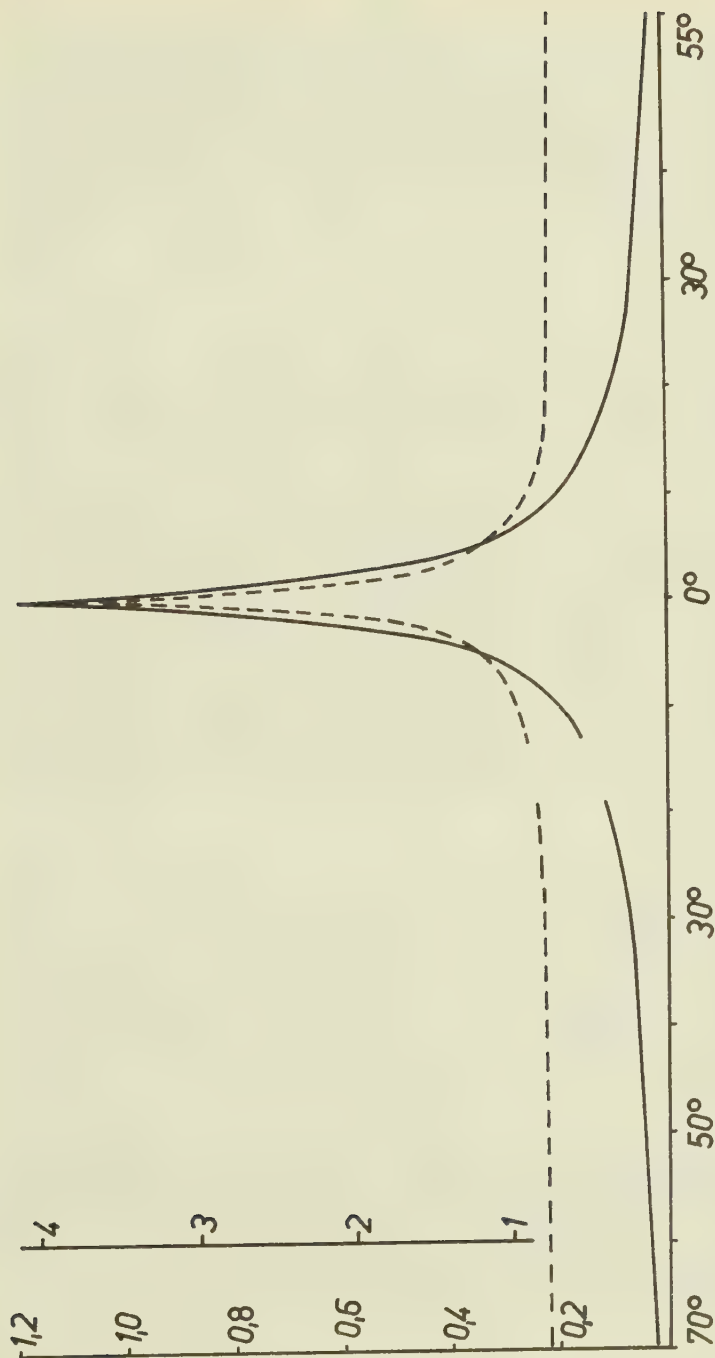


Abb. 17 : Graphische Gegenüberstellung von Sehschärfe und Zapfenverteilung im horizontalen Netzhautmeridian
 — Sehschärfe (Skala außen); - - - - - lineare Zapfendichte pro 10 μ (Skala innen)

nach O e s t e r b e r g eingetragen. Die Anzahl der Zapfen bei 0° wurde von P o l y a k übernommen, da dieser für das Netzhautzentrum genauere Angaben machte als O e s t e r b e r g. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde bei den folgenden Berechnungen, die zum Teil nur Schätzungen sind, auf die Angabe der statistischen Fehlerbelastung verzichtet.

T a b e l l e 8

Exzentrizität	0°	5°	12°	20°	40°	70°
Größe des Netzhautbildes	4,05 μ	14,35 μ	28,6 μ	48,6 μ	94,5 μ	212 μ
lineare Zapfendichte (pro 10 μ)	4,14	1,16	0,88	0,81	0,77	0,75

Aus Tabelle 8 wurde nunmehr berechnet, wieviele Zapfen vom Netzhautbild in linearer Ausdehnung bedeckt werden (Tabelle 9). Da anzunehmen ist, daß die rezeptiven Felder bzw. die zu Funktionseinheiten zusammengefaßten Gruppen eine flächenhafte Ausdehnung besitzen, wurde die Zapfenzahl für die zugehörige Kreisfläche berechnet. Diese Zahl gibt an, wieviele Zapfen der Empfindungseinheiten in den verschiedenen Netzhautbereichen voll vom Netzhautbild bedeckt werden.

T a b e l l e 9

Exzentrizität	0°	5°	12°	20°	40°	70°
lineare Anzahl der vom Netzhautbild bedeckten Zapfen	1,68	1,67	2,5	3,94	7,28	15,9
Anzahl der Zapfen in der zugehörigen Kreisfläche	2,22	2,19	4,9	12,2	41,6	198

Zu einer Kontrastempfindung ist es jedoch nicht nötig, daß ein rezeptives Feld in seiner ganzen Ausdehnung vom Netzhautbild getroffen wird; es genügt ein bestimmter definierbarer Unterschied in der Erregungsstärke benachbarter Empfindungseinheiten.

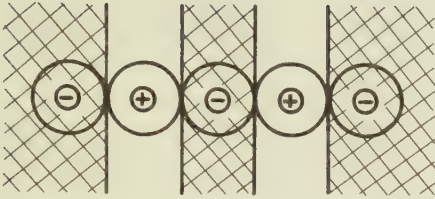


Abb. 18

Ideales Netzhautbild von zwei parallelen hellen Streifen, die jeweils eine Empfindungseinheit (Kreis) voll bedecken

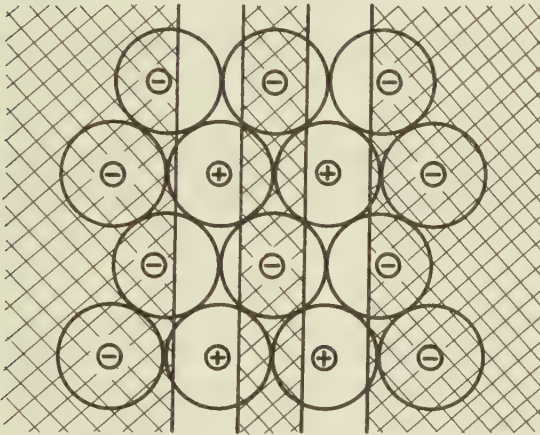


Abb. 19

Die Streifen bedecken keine der Empfindungseinheiten (Kreise) in deren ganzer Ausdehnung. Trotzdem kommt eine Kontrastempfindung zustande, da die mit $\oplus$ markierten Empfindungseinheiten stärker erregt werden als die mit $\ominus$ bezeichneten.

Das bedeutet für das verwendete Sehzeichen (siehe Seite 20), daß das Netzhautbild der beiden hellen Streifen auf zwei Zapfengruppen fallen muß, die etwas stärker erregt werden als eine von ihnen flankierte dritte Empfindungseinheit.

Aus dieser Überlegung ergibt sich, daß ein rezeptives Feld etwas weniger als doppelt so viele Zapfen umfassen müßte, wie deren voll vom Netzhautbild bedeckt sind (Abb. 19). Auf diesem Wege kann auf die wahrscheinliche Gesamtzahl der zu einer Funktionsgruppe vereinigten Zapfen in den verschiedenen Netzhautbereichen des horizontalen Netzhautmeridians geschlossen werden (Tabelle 10).

T a b e l l e 10 : Ungefähre Anzahl der wahrscheinlich zu jeweils
einer Funktionsgruppe zusammengefaßten Zapfen

Exzentrizität	0°	5°	12°	20°	40°	70°
Anzahl der Zapfen	4	4	8	20	72	360

Aus dem Vergleich der gemessenen Sehschärfen im horizontalen Gesichtsfeldmeridian mit den anatomischen Ergebnissen der Zapfendichte von O e s t e r b e r g und von P o l y a k können folgende Schlüsse gezogen werden:

- 1) Wie schon von O p p e l beschrieben, sinkt die Sehschärfe im zentralen und parazentralen Bereich der Netzhaut zwar gleichsinig mit der Zapfendichte (Abb. 17), jedoch sind die Gradienten des Absinkens verschieden.
- 2) Im Gegensatz zur Lehrbuchmeinung geht aus den vorstehenden Ermittlungen hervor, daß die Empfindungseinheit der Netzhautmitte nicht nur aus einem Zapfen besteht. Dagegen wird die Ansicht von O p p e l bestätigt, daß im Zentrum der Netzhaut wahrscheinlich mindestens vier Zapfen ein Funktionsaggregat mit einer gemeinsamen Ganglienzelle und einer afferenten Sehnervenfaser bilden.
- 3) Aus Tabelle 10 geht hervor, daß die Anzahl der in einer Funktionsgruppe zusammengeschlossenen Zapfen vom parazentralen zum peripheren Bereich der Netzhaut größer wird. Das bedeutet, daß die Empfindungseinheit zur Netzhautperipherie hin nicht nur dadurch größer wird, daß die Zapfen dicker werden und weiter auseinanderrücken, sondern vornehmlich durch Zusammenschaltung einer größeren Zahl von Zapfen über eine gemeinsame Ganglienzelle zu einem Funktionsaggregat.

Ein Vergleich der Sehschärfenkurve mit der Zapfenverteilung in den verschiedenen Netzhautabschnitten (Tabelle 8, 9, 10 und Abb. 17) gibt keine völlig befriedigende Erklärung für den zur Peripherie hin erfolgenden Abfall des Auflösungsvermögens. Die genauere Betrachtung der Abb. 17 zeigt, daß ab 15° die Sehschärfe zur Peripherie hin weiter kontinuierlich abnimmt, während die Zapfendichte gleich bleibt. Daraus läßt sich folgern, daß die Zapfenverteilung nicht den ausschlaggebenden Faktor für die abfallende Sehschärfe bildet.

Entscheidend für das Auflösungsvermögen scheint dagegen die Organisation der rezeptiven Felder, die ihre anatomische und physiologische Basis in der Ganglienzellschicht besitzen, weil die Ganglienzellen mit ihren unterschiedlichen Dendritenausbreitungsgebieten eine unterschiedliche Anzahl von Sinneselementen zusammenfassen. Die Sinnesempfindungen des Auges werden dem Gehirn nur durch die im Sehnerven verlaufenden Neuriten der Ganglienzellen zugeleitet.

Die graphische Gegenüberstellung von Sehschärfe und Ganglienzell-dichte zeigt für den peripheren Netzhautbereich einen synchronen Kurvenverlauf (Abb. 20 I und II). Der direkte Vergleich kann für die Netzhautmitte wegen ihrer besonderen anatomischen Struktur nicht geführt werden, deshalb wurde die Ganglienzellverteilung für den Maculabereich nach der topographischen Zuordnung der Ganglienzellen geschätzt (Abb. 20 III). Zu der Gegenüberstellung der geschätzten Ganglienzellverteilungskurve mit der Sehschärfe sind einige wesentliche Gesichtspunkte anzuführen:

- 1) Die Schätzung bezieht ihre Berechtigung daraus, daß die funktionell den zentralen Zapfen zugeordneten Ganglienzellen zur Seite verlagert sind.
- 2) Die Sehschärfe wurde unter photopischen Bedingungen gemessen und ist somit nur von den Zapfen abhängig. Doch ist zu bedenken, daß auch die große Zahl der Stäbchen an Ganglienzellen angeschlossen ist. Dies ist wahrscheinlich der Grund für das geringere Gefälle der Ganglienzellverteilungskurve gegenüber

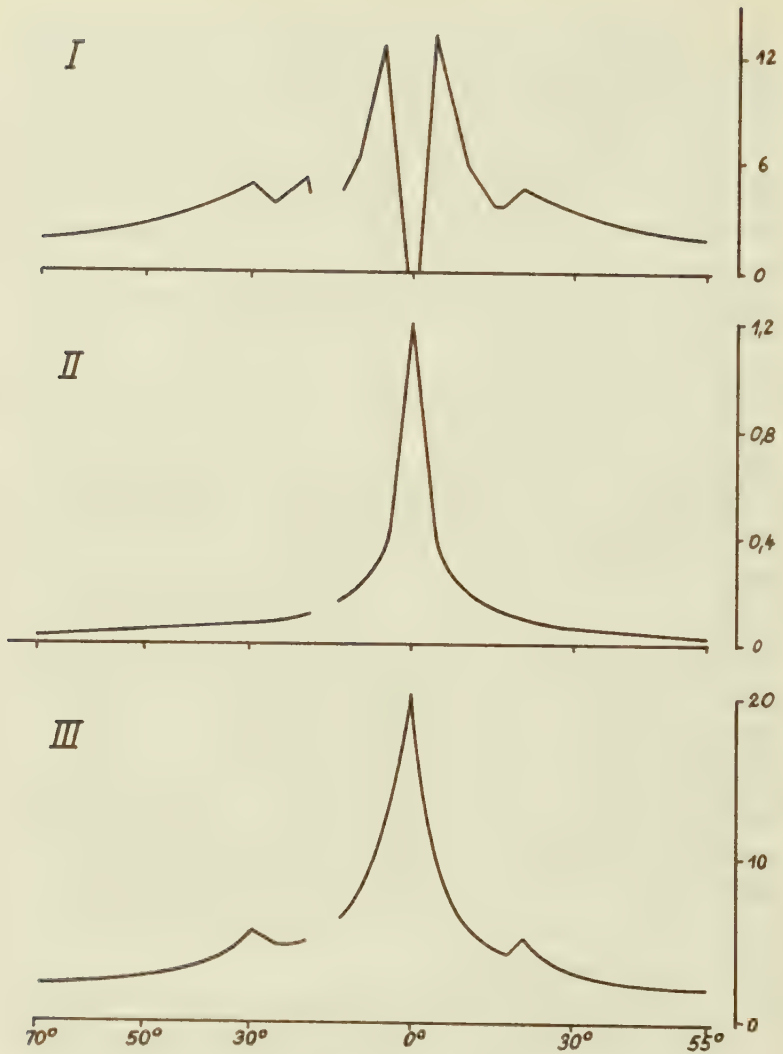


Abb. 20 : Graphische Gegenüberstellung von Sehschärfe und der Verteilung der Ganglienzellen im horizontalen Netzhautmeridian

I = lineare Anzahl der Ganglienzellen pro $63,25 \mu$ (n. O p p e l)
 II = gemessene Sehschärfe

III = Kurve der Ganglienzellverteilung, nach der topographischen Zuordnung der Ganglienzellen geschätzt.

der Sehschärfenkurve (Abb. 20 II und III).

3) Ebenfalls durch die Berücksichtigung der Stäbchen lassen sich die zweiten Gipfel der Kurve 20 III bei ca. 20° bis 30° erklären, denn O e s t e r b e r g fand in dem zugehörigen Bereich des Rezeptorenrasters das Maximum der Stäbchendichte. Außerdem zeigen die praktischen Erfahrungen und wissenschaftliche Untersuchungen (F i c k , K ö s t e r), daß für das Dämmerungs- und Nachtsehen in diesem Bereich eine perimaculäre Ringzone maximalen Auflösungsvermögens liegt.

Aus diesen Erwägungen geht hervor, daß auch aus der Ganglienzellverteilung sich keine absolute Abhängigkeit für die Sehschärfe erwarten läßt. Die große Anzahl der auch an Ganglienzellen angeschlossenen Stäbchen muß bei den hier beschriebenen Messungen der Sehschärfe unter photopischen Bedingungen unberücksichtigt bleiben. Da jedoch die Organisation der rezeptiven Felder unter photopischen, mesopischen und skotopischen Bedingungen wahrscheinlich eine unterschiedliche ist, gelten die hier angestellten Überlegungen nur für den photopischen Bereich.

Es lassen sich nur gewisse Rückschlüsse auf die Größe der rezeptiven Felder unter photopischen Bedingungen ziehen. Die aus der Ganglienzellverteilung in Abb. 20 III berechnete lineare Ausdehnung des zu jeweils einer Ganglienzelle gehörigen rezeptiven Feldes beträgt

$$\text{a) bei } 0^{\circ} : \frac{63,25 \mu}{20} \approx 3,2 \mu ; \quad \text{bei } 70^{\circ} : \frac{63,25 \mu}{1,6} \approx 40 \mu$$

Andererseits kann aus den gemessenen Sehschärfen nach Berechnung der zugehörigen Netzhautbilder (Tabelle 8) die Ausdehnung der Empfindungseinheiten des photopischen Sehens gefolgert werden.

$$\text{b) bei } 0^{\circ} : 4,05 \mu ; \quad \text{bei } 70^{\circ} : 212 \mu$$

Für die Differenz der unter a) und b) aufgeführten Rechenergebnisse gibt es mehrere, sich addierende Ursachen:

1) Die zur Berechnung der Werte unter b) zugrunde gelegte Sehschärfe ist ein Mittelwert von 25 Probanden. Bei einigen

Versuchspersonen wurden bis zu 20% höhere Sehschärfen gemessen, bei anderen entsprechend niedrigere.

2) Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges erreicht in einem Lebensalter von etwa 14 Jahren einen maximalen Wert; mit zunehmendem Alter wird es infolge progredienter Trübung der durchstrahlten Medien des Auges geringer (S c h o b e r). Die hier untersuchten Probanden waren 21 bis 28 Jahre alt, sie hatten also ihr Sehschärfenoptimum schon überschritten.

3) Die verwendeten Sehschärfenwerte wurden unter Tageslichtbedingungen ermittelt; sie fußen damit auf der Reizung der Netzhautzapfen, wogegen die Stäbchen in diesem Helligkeitsbereich keine Bedeutung für die Sehschärfe besitzen. Doch auch den Stäbchen sind Ganglienzellen zur Fortleitung ihrer Erregung zugeordnet.

Die Berücksichtigung dieser drei Punkte hat folgende Konsequenz: Die praktisch gemessene Sehschärfe muß niedriger sein als die theoretisch aus der Ganglienzelldichte kalkulierte Sehschärfe; anders ausgedrückt: Das aus den Versuchsergebnissen berechnete Netzhautbild muß größer sein als nach der Ganglienzelldichte zu erwarten wäre. Diese Diskrepanz ist im peripheren Netzhautbereich am größten, da hier das Rezeptorenraster hauptsächlich aus Stäbchen besteht.

12. Zusammenfassung

Nach einem Überblick über Methoden und Ergebnisse früherer Sehschärfenbestimmungen wurden die eigenen Versuche beschrieben. Bei 25 normalsichtigen Versuchspersonen wurde die Sehschärfe im horizontalen Meridian des einäugigen Gesichtsfeldes bestimmt. Keines der zu klinischen Funktionsprüfungen benutzten Testzeichen wurde verwendet, sondern ein Sehzeichen, das den Anforderungen einer exakten Sehschärfenmessung besser zu entsprechen schien. Es bestand aus zwei parallelen hellen Streifen auf dunklem Grund, deren Abstand voneinander gleich ihrer Breite war; die Länge entsprach der dreifachen Breite. Dieses Sehzeichen wurde unter für das photopische Sehen optimalen Lichtverhältnissen (Beleuchtungsintensität: 2000 lx - 3500 lx, Kontrast: ca. 1 : 30) stufenlos vergrößerbar projiziert.

Die Ergebnisse für die Sehschärfe im horizontalen Gesichtsfeldmeridian bestätigten weitgehend die Arbeiten von W e r t h e i m und von A u l h o r n. Für einen großen Teil des untersuchten Gesichtsfeldbereiches wurde eine lineare Abhängigkeit des kleinsten auflösbaren Gesichtswinkels von den Winkelgraden der Exzentrizität gefunden, was den Angaben von W e y m o u t h entspricht.

Der Vergleich der gemessenen Sehschärfen mit den zugehörigen Werten für die Feinheit des retinalen Zapfenmosaiktes in verschiedenen Gesichtsfeldbereichen (O e s t e r b e r g, P o l y a k) ergab, daß jeweils mehrere Zapfen zu Funktionsgruppen zusammengefaßt sein müssen, welche die Empfindungseinheiten darstellen. Es erscheint wahrscheinlich, daß die Anzahl der zu einer Funktionsgruppe zusammengefaßten Zapfen vom Zentrum zur Peripherie der Netzhaut größer wird.

Im Gegensatz zur Lehrbuchmeinung wurde darauf hingewiesen, daß auch im Netzhautzentrum nicht jeder Zapfen selbständig funktionieren kann, sondern daß auch in der Foveola das Prinzip der

Funktionsgruppe gelten muß, was mit der von O p p e l vertretenen Ansicht übereinstimmt. Es konnte - im Einklang mit dessen Meinung - wahrscheinlich gemacht werden, daß im Netzhautzentrum jeweils mindestens vier Zapfen zu einem Funktionsaggregat mit einer gemeinsamen afferenten Sehnervenfaser zusammengeschlossen sind.

Die Begründung für den Zusammenschluß mehrerer Zapfen zu einer Funktionsgruppe und für die zahlenmäßige Vergrößerung der Funktionsgruppen zur Netzhautperipherie hin wurde in der Verteilung der Ganglienzellen in der Netzhaut gefunden. Dazu wurde angeführt, daß nur die Ganglienzellen über ihre Neuriten die Sinnesempfindungen des Auges dem Gehirn vermitteln und somit letztlich die retinalen Ganglienzellen für das funktionelle Empfindungsraster der Netzhaut verantwortlich sind.

Literatur

- Adler, F. H. : Problems in the Physiologie of Visual Acuity
Arch. Ophth. (Chicago) 11 (1934) 6 - 19
- Aulhorn, E. : Über die Sehschärfe bei herabgesetzter Beleuchtung
Ber. Dtsch. Ophthalm. Ges. 64 (1961)
555 - 559
- Über die Beziehungen zwischen Lichtsinn und Sehschärfe
Graefes Arch. Ophth. 167 (1964) 4 - 74
- Psychophysische Gesetzmäßigkeiten des normalen Sehens
Ber. Dtsch. Ophthalm. Ges. 66 (1965)
144 - 161
- Aubert, H. und R. Förster : Beiträge zur Kenntnis der indirekten Sehschärfe
Arch. Ophth. (Berlin) 3, 2 (1857) 1 - 37
- Dobrowolsky, W. und A. Gaine : Über die Sehschärfe (Formsinn) an der Peripherie der Netzhaut
Pflügers Arch. Physiol. 12 (1876) 411 - 432
- Dor, H. : Beiträge zur Electrotherapie der Augenkrankheiten
Arch. Ophth. (Berlin) 19, 3 (1873) 316 - 332
- Dreyer, V. : On the Exactness of Visual Acuity Charts
Acta ophth. K' hvn 42 (1964) 295 - 306

- Fick, A. E. : Über Stäbchensehschärfe und Zapfensehschärfe
Arch. Ophth. (Berlin) 45 (1898) 336 - 356
- François, J.,
G. Verriest et
R. Coppieters : Nouvelle technique pour l'étude clinique de
la relation entre l'éclairement rétinien et
l'acuité visuelle
Ophthalmologica (Basel) 147 (1964) 325 - 333
- Goldmann, H. : Objektive Sehschärfenbestimmung
Ophthalmologica (Basel) 105 (1943) 240 - 252
- Guillery, H. : Über die Empfindungskreise der Netzhaut
Pflügers Arch. Physiol. 68 (1897) 120 - 143

in Handb. d. norm. u. path. Physiologie
12, 2 (Berlin, 1931) 745 - 808
- Hofmann, H. : Die Lehre vom Raumsinn
in Graefe-Saemisch Handb. d. Augenhk. 3, 13
(Leipzig, 1931) 1 - 58
- Hück, A. : Von den Grenzen des Sehvermögens
Müllers Arch. Anat., Physiol. u. med.
Wissensch. (1840) 92 - 98
- König, A. : Die Abhängigkeit der Sehschärfe von der
Beleuchtungsintensität
in Gesammelte Abhandlungen zur Physiol.
Optik (Leipzig, 1903) 378 - 392
- Köster, F. : Über Stäbchen- und Zapfensehschärfe
Zbl. Physiol. (Leipzig) 10 (1896) 433 - 436

- Kries, J. v. : Über die Abhängigkeit von zentraler und peripherer Sehschärfe von der Lichtstärke
Zbl. Physiol. (Leipzig) 8 (1894) 694 - 697
- Landolt, I. : in Graefe-Saemisch Handb. d. Augenhk. 4, 1
2. Aufl. (Leipzig, 1904) 483 - 489
- Die Vereinheitlichung der Bestimmung der Sehschärfe
Zschr. Augenhk. , Berlin 13 (1905) 530 - 539
- Lebensohn, J. E. : Snellen on Visual Acuity
Amer. J. Ophth. 53 (1962) 152 - 155
- Low, F. N. : Peripheral Visual Acuity
A.M.A. Arch. Ophth. 45 (1951) 80 - 99
- Ludvigh, E. : Extrafoveal Visual Acuity as Measured with Snellen Test-Letters
Amer. J. Ophth. 24 (1941) 303 - 309
- Monjé, M. : Die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Darbietungszeit
Ber. Dtsch. Ophth. Ges. 55 (1949) 270 - 272
- Monjé, M. und H. Schober : Vergleichende Untersuchungen an Sehproben für die Fernvisusbestimmung
Klin. Mbl. Augenhk. , Stuttgart 117 (1950) 561 - 570
- Müller, J. : Handbuch der Physiologie des Menschen
2, 5 (Koblenz, 1840) 250 - 393

- Müller -
Limmroth, W. : Der Gesichtssinn
in Landois-Rosemann, Lehrb. d. Physiol.
d. Menschen, 28. Aufl. Bd. 2 (München, 1962)
850 - 855
- Oesterberg, G. : Topography of the Layer of Rods and Cones
in the Human Retina
Acta ophth. K' hvn 6 (1935) 1 - 102
- Oppel, O. : Mikroskopische Untersuchungen über die
Anzahl und Kaliber der markhaltigen Nerven-
fasern im Fasciculus opticus des Menschen
Graefes Arch. Ophth. 166 (1963) 19 - 27
- Quantitative Untersuchungen über die Retina-
ganglien und Optikusfasern
in Die Struktur des Auges
Stuttgart 1965, 97 - 108
- Über neue Aspekte zur strukturellen Gliede-
rung und Funktion der Netzhautmitte
Vortrag auf dem 20. internat. Ophthalmolo-
genkongreß München, 14. bis 19. August 1966
(im Druck)
- Untersuchungen über die Verteilung und Zahl
der retinalen Ganglienzellen beim Menschen
Graefes Arch. Ophth. 172 (1967) 1 - 22
- Oppel, O. und
W. Jorde : Über Untersuchungen der Sehschärfe in ver-
schiedenen Gesichtsfeldbereichen bei Ambly-
opien mit exzentrischer Fixation unter beson-
derer Berücksichtigung des Gesichtsfeld-
zentrums
Graefes Arch. Ophth. 167 (1964) 415 - 440

- Polyak, S. L. : The Retina
Chicago 1941, 200 - 202 und 448
- Randall, H.
J. D. Brown, and
L. L. Sloan : Peripheral Visual Acuity
A.M.A. Arch. Ophth. 75 (1966) 500 - 504
- Ruppert, L. : Ein Vergleich zwischen dem Distinktions-
vermögen und der Bewegungsempfindlichkeit
der Netzhautperipherie
Zschr. Sinnesphysiol., Leipzig 42 (1908)
409 - 416
- Schober, H. : Das Sehen
Bd. 2, 2. Aufl. (Leipzig, 1958) 225 - 277
- Sloan, L. L. : New Test Charts for the Measurement of
Visual Acuity at far and near Distances
Amer. J. Ophth. 48,2(1959) 807 - 813

Measurement of Visual Acuity
A.M.A. Arch. Ophth. 45 (1951) 704 - 711
- Sloan, L. L. and
J. D. Brown : Reading Cards
Amer. J. Ophth. 55 (1963) 1187 - 1199
- Tojo, H. and
M. Tsuji : Objective Measurement of Visual Acuity
Using a Brown-Tube and EOG
Jap. J. Med. Sc. - Ophth. 10, 2 (1966) 49 - 57
- Tschermak-
Seysenegg, A. v. : Einführung in die physiologische Optik
2. Aufl. (Wien, 1947) 13 - 18

- Volkmann, A. W. : in Wagners Handwörterbuch der
Physiologie
Bd. 3, 1 (Koblenz, 1846) 331 - 349
- Wertheim, Th. : Über die indirekte Sehschärfe
Zschr. Psychol. Physiol. Sinnesorg.,
Leipzig 7 (1894) 172 - 187
- Weymouth, F. W. : Visual Sensory Units and the Minimal
Angle of Resolution
Amer. J. Ophth. 46, 2 (1958) 102 - 113

Herrn Professor Dr. med. O. Oppel danke ich für das Überlassen dieser Arbeit und für seine freundliche Anleitung und Unterstützung bei deren Erstellung.

Herrn Dr. Klarmann bei der Fa. Josef Schneider & Co., Bad Kreuznach, sei Dank ausgesprochen für seine Hilfe bei der Entwicklung der Versuchsanordnung und für das Ausleihen der nötigen optischen Geräte.

Lebenslauf

Am 6. Mai 1941 wurde ich in Korschenbroich (Kreis Grevenbroich) geboren und wohnte seitdem bei meinen Eltern in Mönchengladbach. Zu Ostern 1947 wurde ich eingeschult und besuchte ab Ostern 1951 das Mathematisch-Naturwissenschaftliche Gymnasium in Mönchengladbach, wo ich im März 1960 die Reifeprüfung bestand.

Zum Sommersemester 1961 wurde ich in die Medizinische Fakultät der Universität Bonn aufgenommen; dort legte ich nach dem Wintersemester 1961/62 die Naturwissenschaftliche Vorprüfung ab. Vom Wintersemester 1962/63 an studierte ich in Heidelberg, wo ich im April 1964 die Ärztliche Vorprüfung bestand. Im Wintersemester 1964/65 war ich bei der Universität Wien immatrikuliert und studiere nun seit dem Sommersemester 1965 an der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz.

